

данные пока не позволяют сделать заключение о природе электронных ловушек.

Рассмотрим теперь область возрастания A (см. рисунок): точки для нелегированных и слабо легированных бором образцов ложатся на общую кривую. Это позволяет аналогично [9, 10] интерпретировать рост A как результат возрастания плотности уровней D^+ (перезарядка $D^0 \rightarrow D^+$, D^+ — положительно заряженная оборванная связь).

Для $a\text{-Si} : \text{H} \langle B \rangle$ считается, что уровни D^+ расположены выше D^0 , и тогда рост A обусловлен переходами на них электронов из валентной зоны. На основании данных настоящей работы приходится заключить, что перезарядка уровней $D^0 \rightarrow D^+$ имеет место не только в легированных бором, но и в нелегированных образцах $a\text{-Si} : \text{H}$ при $|\varepsilon_c - \varepsilon_F| > E_g/2$. Следует отметить, что в рассматриваемой области $(\mu\tau)_{cc}^{(p)} \simeq (\mu\tau)_{cc}^{(n)}$ (см. рисунок). Как указывалось выше, это означает, что плотности D^0 достаточно низки, т. е. подтверждается заключение о перезарядке уровней $D^0 \rightarrow D^+$. В пользу этого свидетельствует и заметное снижение $(\mu\tau)_{cc}^{(n)}$: центры D^+ имеют более высокое сечение захвата электронов, чем D^0 . Тем не менее причина расположения уровней D^+ выше, чем D^0 , даже и для легированных бором образцов $a\text{-Si} : \text{H}$ [11] остается пока не понятой.

Список литературы

- [1] Hotaling S. P., Antoniadis H., Shiff E. A. // J. Non-Cryst. Sol. 1989. V. 114. P. 600—602.
- [2] Liu J. Z., Maruyama A., Wagner S., Delonoy A. // J. Non-Cryst. Sol. 1989. V. 114. P. 363—365.
- [3] Juška G., Jukonis G., Kočka J. // J. Non-Cryst. Sol. 1989. V. 114. P. 354—356.
- [4] Kočka J., Šipec E., Štuka D., Curtins H., Juška G. // J. Non-Cryst. Sol. 1989. V. 114. P. 336—338.
- [5] Kakanuma H., Kasuya Y., Sakamoto M., Shibato S. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 6. P. 2307—2312.
- [6] Голикова О. А., Бабаходжаев В. С., Казанин М. М., Мездрогина М. М., Арлаускас К., Юшка Г. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 7. С. 1190—1193.
- [7] Голикова О. А., Бабаходжаев В. С., Казанин М. М., Мездрогина М. М. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 7. С. 1190—1193.
- [8] Jacson W. B., Amer N. M. // Phys. Rev. B. 1982. V. 25. N 8. P. 5559—5566.
- [9] Kočka J., Vaneček M., Schauer F. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 715—717.
- [10] Mizukava S., Isawa M., Kuroiwa K., Sato K., Yasihiro K., Tarui Y. // Japan. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. N 6. Pt 1. P. 961—965.
- [11] Ley L. // J. Non-Cryst. Sol. 1989. V. 114. P. 238—243.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 9.10.1990
Принято к печати 17.10.1990

ФТП, том 25, вып. 3, 1991

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ЯДЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Иванов Н. А., Заблоцкий В. В.

В настоящее время улучшение однородности свойств материалов в результате ядерного легирования достигается главным образом за счет создания в объеме исходных слитков дополнительной равномерно распределенной примеси с концентрацией атомов $N_{\text{дл}}$, значительно (в 10 и более раз) превышающей исходную концентрацию примеси $N_{\text{вск}}$ [1, 2]. Однако условие $N_{\text{дл}} \gg N_{\text{вск}}$ в ряде случаев может оказаться избыточным или практически невыполнимым, например, из-за слишком большой длительности облучения и трудностей с подбором исходных слитков с требуемыми параметрами. Кроме того, выполнение указанного условия из-за увеличения продолжительности облучения может привести к столь значительному возрастанию стоимости материала, что его получение станет экономически неоправданным. В связи с этим в настоящей работе рас-

смотрена возможность оптимизации процесса получения ядерно-легированных материалов с минимальной неоднородностью удельного сопротивления ρ для случая образования примесей, характер которых совпадает с характером примеси в исходном кристалле.

Величина относительного разброса удельного сопротивления в ядерно-легированных материалах $\delta\rho_{\text{р.л}}$ определяется в основном флуктуациями ρ в исходном слитке $\delta\rho_{\text{исх}}$, неоднородностью распределения концентрации носителей заряда, образованных в результате ядерных реакций $\delta n_{\text{р.л}}$, и степенью легирования $G = N_{\text{р.л}}/N_{\text{исх}}$. Влияние этих факторов на микро- и макронеоднородность удельного сопротивления изучалось в работе [3] на примере нейтронного трансмутационного легирования кремния. Было показано, что при использовании в качестве исходного кремния монокристаллов n -типа проводимости экспериментальные значения $\delta\rho_{\text{р.л}}$ в нейтронно-легированном кремнии (НЛК) хорошо описываются теоретической зависимостью

$$\delta\rho_{\text{р.л}} = 1/\alpha \sqrt{\delta^2\rho_{\text{исх}} + \delta^2 n_{\text{р.л}} (\alpha - 1)^2}, \quad (1)$$

где $\alpha = \rho_{\text{исх}}/\rho_{\text{р.л}}$ — отношение величин удельного сопротивления в исходном кремнии и НЛК, равное $\alpha = G + 1$ для исходного кристалла n -типа проводимости. Аналогичные выводы были сделаны и в работе [4] при исследовании флуктуаций удельного сопротивления в образцах γ -легированного кремния (ГЛК) на основе исходных монокристаллов p -типа проводимости, в которых под действием γ -квантов создавалась акцепторная примесь алюминия.

Анализ выражения (1) показывает, что зависимость $\delta\rho_{\text{р.л}}$ от α (или G) является немонотонной и функция $\delta\rho_{\text{р.л}}(\alpha)$ имеет минимум. Оптимальные значения $\alpha_{\text{опт}}$, при которых разброс удельного сопротивления минимален [т. е. $\delta\rho_{\text{р.л}}(\alpha_{\text{опт}}) = \delta\rho_{\text{р.л}}^{\text{min}}$], определяются путем решения уравнения $d\rho_{\text{р.л}}/d\alpha = 0$ и равны

$$\alpha_{\text{опт}} = \frac{\delta^2\rho_{\text{исх}} + \delta^2 n_{\text{р.л}}}{\delta^2 n_{\text{р.л}}} = 1 + S^2, \quad (2)$$

где $S = \delta\rho_{\text{исх}}/\delta n_{\text{р.л}}$. Соответственно

$$\delta\rho_{\text{р.л}}^{\text{min}} = \frac{\delta\rho_{\text{исх}}\delta n_{\text{р.л}}}{\sqrt{\delta^2\rho_{\text{исх}} + \delta^2 n_{\text{р.л}}}} = \delta n_{\text{р.л}} \frac{S}{\sqrt{S^2 + 1}}. \quad (3)$$

Из определения величины α с учетом равенства $\delta\rho_{\text{исх}} = \delta n_{\text{исх}}$ [3] следует, что для оптимальной концентрации носителей заряда, создаваемых в результате ядерного легирования $n_{\text{р.л}}^{\text{опт}}$, при которой достигается минимальный разброс $\delta\rho_{\text{р.л}}^{\text{min}}$, выполняется соотношение

$$n_{\text{р.л}}^{\text{опт}}\delta^2 n_{\text{р.л}} = n_{\text{исх}}\delta^2 n_{\text{исх}}. \quad (4)$$

При дальнейшем рассмотрении положим $S \geq 1$, что реализуется в большинстве практически важных случаев. Из выражения (3) следует, что величина $\delta\rho_{\text{р.л}}^{\text{min}}$ меньше, чем $\delta n_{\text{р.л}}$, для любых S , и отношение $\delta\rho_{\text{р.л}}^{\text{min}}/\delta n_{\text{р.л}} = S/\sqrt{S^2 + 1}$ имеет минимальное значение $\sqrt{2}/2$ при $S = 1$ (т. е. при $\delta\rho_{\text{исх}} = \delta n_{\text{р.л}}$). График зависимости $\delta\rho_{\text{р.л}}^{\text{min}}/\delta n_{\text{р.л}}$ от S представлен на рисунке, на котором приведены также экспериментальные результаты из работы [4] по разбросу удельного сопротивления в образцах ГЛК. Сравнение показывает, что экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются между собой.

Из наличия минимума функции $\delta\rho_{\text{р.л}}(\alpha)$ с учетом неравенства $\delta\rho_{\text{р.л}}^{\text{min}} < \delta n_{\text{р.л}}$ следует, что при α , больших некоторого граничного значения $\alpha_{\text{гр}}$, величина $\delta\rho_{\text{р.л}}$ также должна быть меньше, чем $\delta n_{\text{р.л}}$. Это граничное значение определяется из выражения (1) и составляет $\alpha_{\text{гр}} = \alpha_{\text{опт}}/2$. В соответствии с выражением (2) $\alpha_{\text{опт}}$ и $\alpha_{\text{гр}}$ зависят только от отношения S . Графики функций $\alpha_{\text{опт}}(S)$ и $\alpha_{\text{гр}}(S)$ приведены на рисунке.

С помощью выражений (2) — (4) представляется возможным оптимизировать процесс ядерного легирования относительно получения полупроводниковых материалов с минимальным разбросом удельного сопротивления. Так, напри-

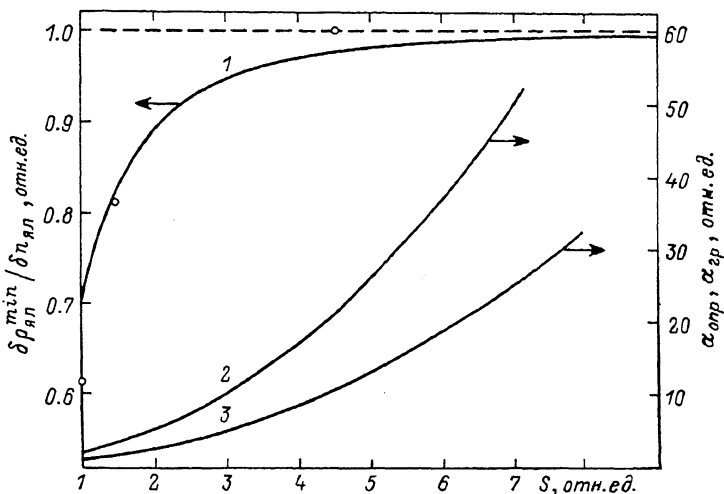
мер, при облучении исходных слитков с параметрами $\rho_{исх}$ и $\delta\rho_{исх}$ оптимальные значения $n_{ял}^{opt}$ и $\rho_{ял}^{opt}$ в соответствии с выражением (4) составят

$$n_{ял}^{opt} = n_{исх} \frac{\delta^2 \rho_{исх}}{\delta^2 n_{ял}}, \quad \rho_{ял}^{opt} = \frac{\rho_{исх}}{\alpha_{opt}}. \quad (5)$$

В тех случаях, когда ставится задача получения ядерно-легированного материала с заданными величинами $\rho_{ял}$ и $\delta\rho_{ял}$, на основании выражений (3) и (4) имеем следующее соотношение для оценки параметров исходных слитков:

$$\rho_{исх}^{opt} = \rho_{ял} \left(1 + \frac{\delta^2 \rho_{исх}}{\delta^2 n_{ял}} \right) \text{ при } \delta n_{ял} \leq \frac{\delta \rho_{исх} \delta \rho_{ял}}{\sqrt{\delta^2 \rho_{исх} - \delta^2 \rho_{ял}}}. \quad (6)$$

Анализ полученных результатов показывает, что минимальные значения разброса $\delta\rho_{ял}$ могут быть достигнуты при $\delta\rho_{исх} \approx \delta n_{ял}$ ($S \approx 1$). Для случая $S \geq 3$



Графики зависимостей величин $\delta\rho_{ял}^{min}/\delta n_{ял}$, α_{opt} и $\alpha_{гр}$ от величины отношения S (1—3). Точки — экспериментальные данные [4].

значения $\delta\rho_{ял}^{min}$ близки к величине $\delta n_{ял}$ (см. рисунок). В связи с этим при $S \geq 3$ в выражении (5) вместо α_{opt} может использоваться величина $\alpha_{гр}$, что позволяет практически в 2 раза уменьшить продолжительность облучения.

В заключение отметим, что выражение (1) применимо для всех случаев легирования материалов примесями, создающими одинаковый тип проводимости, при условии, что их пространственные распределения независимы. Соответственно полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для оптимизации других методов легирования полупроводников (например, ионной имплантации, эпитаксии). В этом случае оптимальная величина концентрации вводимой примеси определяется выражением (4).

Список литературы

- [1] Смирнов Л. С., Соловьев С. П., Стась В. Ф., Харченко В. А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск, 1981. 182 с.
- [2] Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников / Под ред. Дж. Миза. М., 1982. 264 с.
- [3] Юрова Е. С., Федоров В. В., Мороховец М. А., Гребенникова О. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 5. С. 933—937.
- [4] Гринштейн П. М., Гучетль Р. И., Заблоцкий В. В., Иванов Н. А., Космач В. Ф., Леонов Н. Н., Петренко В. В., Стук А. А., Федоров В. В., Харченко В. А., Юрова Е. С. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1088—1092.