

- [4] Kunio T., Nishino T., Ohta E., Sakata M. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. N 12. P. 1087—1091.
- [5] Фистуль В. И. Распад пересыщенных полупроводниковых твердых растворов. М., 1977. 240 с.
- [6] Nam F. // J. Phys. Chem. Sol. 1958. V. 6. N 2. P. 335—351.
- [7] Бендик Н. Т., Гарнык В. С., Милевский Л. С. // ФТТ. 1970. Т. 12. В. 1. С. 190—194.
- [8] Colas E. G., Weber E. R., Hull R. // Mater. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. N 3. P. 881—889.
- [9] Nam F. // J. Appl. Phys. 1959. V. 30. N 3. P. 1518—1524.
- [10] Семин Ю. А., Скупов В. Д., Тетельбаум Д. И. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 3. С. 273—276.
- [11] Семин Ю. А., Скупов В. Д., Тетельбаум Д. И., Шенгуров В. Г. // Тез. докл. XVIII Всес. совещ. по взаимодействию заряженных частиц с кристаллами. М., 1988. С. 443.

Получено 3.03.1989
Принято к печати 9.06.1989

Горьковский исследовательский
физико-технический институт
ГГУ им. Н. И. Лобачевского

ФТП, том 23, вып. 11, 1989

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОПЛЕНИЙ КОМПЕНСИРУЮЩИХ ЦЕНТРОВ В *n*-Si

Витман Р. Ф., Витовский Н. А., Лебедев А. А.,
Машовец Т. В., Налбандян Л. В.

Сведения о характере распределения примесных атомов и дефектов структуры в кремнии очень важны, поскольку примесные и дефектные скопления существенно влияют на свойства изготавливаемых приборов. Образующиеся скопления дефектов могут иметь различные природу и тип электрической активности, размеры скоплений и концентрация дефектов в них также могут быть весьма различными; в соответствии с этим для исследования скоплений применяются различные методы [1-5].

В настоящей работе с помощью фотоэлектрического метода, описанного в [6-8], исследовались «микромасштабные» скопления компенсирующих центров в *n*-кремнии, характеризующиеся линейными размерами r_0 (не превышаю-

Атмосфера	$N_D \cdot 10^{14}$, см ⁻³	$N_A \cdot 10^{14}$, см ⁻³	$N_O \cdot 10^{16}$, см ⁻³	$N_C \cdot 10^{16}$, см ⁻³	Условия термообработки		
					T, °C	t, ч	v , °C/мин
Вакуум	2	0.2	2	0.9—1.1	450	24	10 ³
					630	24	10 ³
					700	24	10 ³
					800	24	10 ³
					900	24	10 ³
					900	48	10 ³
					900	96	10 ³
»	6.5	1	7—9	2—3.5	900	24	3
					900	24	0.6
					1000	24	10 ³
					1100	10	10 ³
					1300	3	10 ³
					1300	22	10 ³
					1300	22	10 ³
» Аргон	12	0.3	140 83—96	5	900	48	10 ³
					700	24	
					750	24	
					800	24	
					850	24	

Примечание. Материалы, полученные в вакууме, — из СССР, в аргоне — из ГДР.

дими длину волны де-Бройля $\lambda = 100-2000 \text{ \AA}$) и содержащие несколько единиц или десятков центров, что соответствует концентрации центров в скоплениях $10^{18}-10^{20} \text{ см}^{-3}$. В таких скоплениях центры не образуют зерен преципитата, а сохраняют свою индивидуальную электрическую активность. Целью работы явилось исследование влияния условий выращивания и последующей термообработки на параметры скоплений описанного типа. Определялись концентрации скоплений N_z , каждое из которых содержит z акцепторов, т. е. могла быть получена функция распределения скоплений по числу z . Кроме того, по температурным зависимостям электропроводности и коэффициента Холла определялись полные концентрации доноров N_d и акцепторов N_a в исходном состоянии и на разных стадиях термообработки.

Исследовался обычный промышленный кремний n -типа с сопротивлением $\rho = 5-10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, выращенный методом бестигельной зонной плавки (Si-Fz) и по методу Чохральского (Si-Cz) в вакууме и в атмосфере аргона.¹ Данные о примесном составе образцов и условиях выращивания и термообработки представлены в таблице.

Во всех материалах независимо от способа их получения — как методом бестигельной зонной плавки, так и методом Чохральского в вакууме и в аргоне наблюдаются скопления, характеризующиеся указанными пространственными размерами ($r < \lambda$) и включающие в свой состав 2—12 индивидуальных акцепторов. Суммарная концентрация таких скоплений достигает 10^{13} см^{-3} .

На рис. 1, $a-e$ представлены зависимости $N_z(z)$ для разных материалов, прошедших одну и ту же термообработку, или, напротив, для одного и того же материала при разных температурах термообработки. Видно, что термообра-

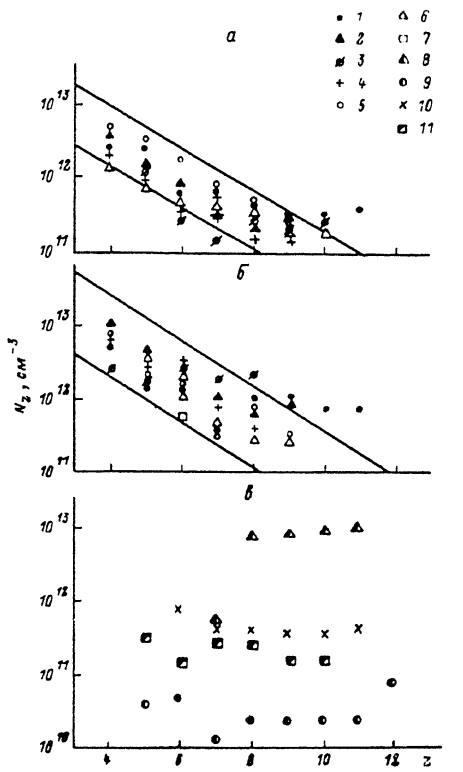


Рис. 1. Функция распределения скоплений $N_z(z)$ в n -Si, подвергнутом термообработке при различных температурах.

Время термообработки 24 ч; температура термообработки, °C: 1 — 450, 2 — 630, 3, 8 — 700, 4, 10 — 800, 5, 11 — 900, 6 — 1000, 7 — 1300, 9 — 750. $a, б$ — СССР, $в$ — ГДР. a — Si-Fz, $б, в$ — Si-Cz.

ботка в интервале температур 630—1000 °C при длительности $t=24$ ч не оказывает существенного влияния на размеры и концентрацию скоплений. Может быть отмечена существенная разница вида функции N_z для термообработанного кремния, выращенного по методу Чохральского в СССР и в ГДР: если для первого эта зависимость может быть представлена экспонентой $N_z \sim \exp(-\beta z)$, где β лежит в пределах $0.2 \leq \beta \leq 0.4$, то для второго N_z практически не зависит от z .

Термообработка при 450 °C длительностью 24 ч приводит к появлению крупных скоплений (до $z=12$).

Прогрев при 1300 °C в течение 22 ч приводит к рассасыванию скоплений, скопления с $z > 6$ исчезают. Концентрация N_6 становится равной концентрации N_9 в нетермообработанном материале. Создается впечатление, что такая термообработка приводит к уменьшению числа акцепторов в каждом из скоплений в среднем на три единицы. Отметим, что уменьшения z не происходит при термообработке ни при 1250 °C в течение 20 ч, ни при 1300 °C в течение 3 ч.

¹ Материал, вытянутый по методу Чохральского в атмосфере аргона, был получен из ГДР.

На рис. 2 представлена зависимость функции распределения $N_z(z)$ от длительности термообработки и при 900 °С. Оказалось, что можно подобрать оптимальный режим термообработки при длительности прогрева 48 ч, при котором концентрация скоплений минимальна. Скорость охлаждения также оказывает влияние на вид функции N_z , эта зависимость показана на рис. 3. При медленном охлаждении относительная доля мелких скоплений уменьшается, а крупных — возрастает.

Перейдем к обсуждению полученных результатов. Несмотря на то что в исследованных образцах степень компенсации невелика, концентрация скоплений компенсирующих центров и их масштабы значительно выше статистически флуктуаций концентрации акцепторов. Это означает, что во всех исследованных материалах в процессе выращивания образуются зародыши комплексообразования.

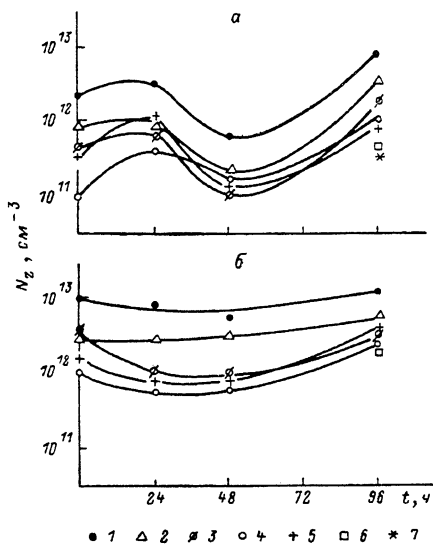


Рис. 2. Зависимость функции распределения скоплений акцепторов от длительности термообработки при 900 °С.

Заряд скоплений z : 1 — 4, 2 — 5, 3 — 6, 4 — 7, 5 — 8, 6 — 9, 7 — 10. а, б — то же, что на рис. 1.

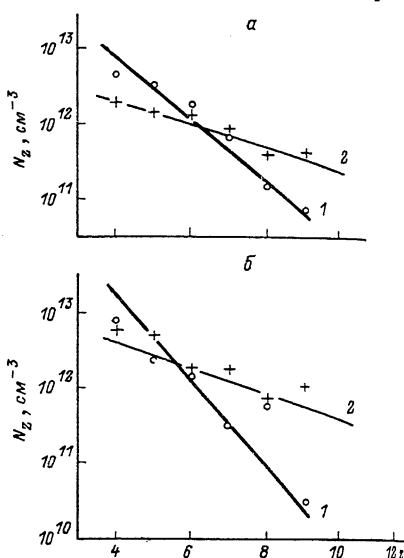


Рис. 3. Зависимость вида функции распределения скоплений акцепторов $N_z(z)$ от скорости охлаждения Si после термообработки при 900 °С в течение 24 ч. Скорость охлаждения, °С/мин: 1 — 10^0 , 2 — 10^1 . а, б — то же, что на рис. 1.

вания для компенсирующих центров. Полная концентрация акцепторов (10^{12} — 10^{14} см $^{-3}$) приблизительно лишь вдвое больше суммарной концентрации акцепторов, входящих в скопления.

Можно утверждать, что исследованные скопления образованы не атомами примесей III группы. Действительно, время прилипания дырок на акцепторы, входящие в скопления, не должно быть меньше наблюдаемых времен релаксации фотопроводимости [9] ($\tau_{\text{пр}} \geq 10^5$ с при 77.4 К). Оценка интенсивности теплового выброса дырок с акцепторов в валентную зону показывает, что для выполнения этого условия акцепторный уровень должен располагаться не ниже, чем $E_p + 0.24$ эВ.

Концентрация таких примесей, как Fe, Ni, Co, Cu, Au, в исследованном материале, по данным DLTS, не превышает 10^{11} см $^{-3}$, таким образом, эти примеси также не могут быть ответственными за наблюдаемые скопления. Есть основание считать, что кислород также не принимает участия в их формировании. Действительно, характеристики скоплений в Si-Fz и Si-Cz одинаковы, хотя как концентрация кислорода, так и интенсивность выпадения фазы SiO $_2$ в местах его скопления в Si-Cz выше.

Наиболее вероятным является предположение о существенной роли примеси углерода в формировании скоплений акцепторов. Эти соображения основываются на наблюдении следующих корреляций между поведением исследован-

ных скоплений и микродефектов В-типа и страт [10]: а) исследованные скопления, так же как и крупные скопления межузельных атомов углерода и кремния (В-дефекты, страты), имеют сопоставимые размеры масштаба сотен ангстрем, по крайней мере в одном измерении [10]; б) температура образования тех и других, по-видимому, близка к точке плавления кремния, поскольку их рассасывание происходит при $T \geq 1300$ °С при отсутствии влияния более низких температур на их размеры и концентрацию.

В то же время имеются свидетельства участия углерода в формировании В-дефектов: 1) пространственное распределение В-дефектов соответствует распределению примесей с коэффициентом сегрегации, меньшим единицы (углерод, кислород); 2) концентрация В-дефектов определенно связана с концентрацией углерода [10]; 3) отжиг при 1200 °С в течение 400 ч устраняет полосчатую неоднородность в распределении углерода (страты), в этом же режиме происходит отжиг В-дефектов [10].

Можно думать, что при охлаждении кристалла в процессе выращивания диапазон температур 1400—1300 °С проходит настолько быстро, что образовавшиеся при затвердевании скопления углерода не успевают раствориться, именно они и являются наблюдаемыми скоплениями, их последующие укрупнение и уплотнение приводят к образованию В-дефектов.

Список литературы

- [1] Inoue M., Teramoto I., Takayanagi S. // J. Appl. Phys. 1962. V. 38. N 8. P. 2578—2582.
- [2] Воронков В. В., Воронкова Г. И., Зубов В. В., Калинин В. П., Крынецкий В. В., Мурина Т. М., Прохорова А. М. // ФТТ. 1977. Т. 19. В. 6. С. 1774—1781.
- [3] Betnewitz I., Kolbesen B., Mayer K., Schuh G. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. N 5. P. 277—279.
- [4] Витман Р. В., Гусева Н. Б., Лебедев А. А. // Письма ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 14. С. 837—839.
- [5] Баграев Н. Т., Власенко Л. С., Карпов Ю. А. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 1. С. 82—85.
- [6] Витовский Н. А. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 882—885.
- [7] Витовский Н. А., Емельяненко О. В., Лагунова Т. С., Рахимов О. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 6. С. 1122—1124.
- [8] Баграев Н. Т., Витовский Н. А., Власенко Л. С., Машовед Т. В., Рахимов О. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 11. С. 1979—1984.
- [9] Рыбкин С. М. Фотозлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 490 с.
- [10] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 475 с.

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

Получено 30.05.1989
Принято к печати 9.06.1989

ФТП, том 23, вып. 11, 1989

КВАНТОВЫЙ ВЫХОД ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИТТЕРБИЯ В ФОСФИДЕ ИНДИЯ

Васильев А. Э., Касаткин В. А., Савельев В. П.

В недавно опубликованной работе [1] было отмечено существенное различие спектров возбуждения люминесценции иона иттербия в фосфиде индия, снятых авторами [1] и приведенных в [2]. Это привело к тому, что в каждой работе предлагается альтернативная модель механизма возбуждения, объясняющая оригинальные спектры и ставящая под сомнение ранее полученные.

Анализируя экспериментальные результаты, опубликованные в [1-3], мы пришли к убеждению, что несоответствие обусловлено различием факторов, формирующих спектры возбуждения. Для примера рассмотрим влияние на спектр возбуждения люминесценции поглощения возбуждающего света кристаллом. Для простоты не будем учитывать интерференционные эффекты, так как