

мен жизни неравновесных носителей заряда носят экспоненциальный характер, примеси становятся центрами рекомбинации.

Таким образом, представленные в настоящей работе результаты показывают, что полученные экспериментально температурные зависимости  $\tau_n$  и  $\tau_p$  хорошо объясняются рекомбинацией неравновесных носителей заряда через рекомбинационные центры, роль которых выполняют глубокие примесные состояния, описанные в [7].

Автор признателен В. И. Трифонову за полезные обсуждения результатов работы.

#### Список литературы

- [1] Богданов Е. В., Брандт Н. Б., Мананков В. М., Флейшман Л. С. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 7. С. 1263—1268.
- [2] Рывкин С. М. Фотозлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 494 с.
- [3] Трифонов В. И., Мартяхин В. А., Стукан В. А., Заец Н. Ф. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 8. С. 1641—1644.
- [4] Равич Ю. И. Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение. М., 1967. 96 с.
- [5] Смит С. Полупроводники. М., 1982. 560 с.
- [6] Мартяхин В. А., Олейников А. Я., Смирнов А. Я., Стукан В. А., Трифонов В. И. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 9. С. 1716—1719.
- [7] Мартяхин В. А., Трифонов В. И. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 3. С. 407—411.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР  
Москва

Получено 23.05.1986  
Принято к печати 10.07.1989

ФТП, том 23, вып. 12, 1989

## ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА НА ПОВЕДЕНИЕ МАРГАНЦА В *n*-Si

Лебедев А. А., Абдурахманов К. П., Витман Р. Ф.,  
Гусева Н. Б., Далиев Х. С., Утамурадова Ш. Б.

Среди примесей, создающих глубокие уровни в запрещенной зоне и обладающих высокой миграционной способностью и поэтому зачастую ответственных за деградацию различных характеристик полупроводниковых приборов, особое место занимают переходные металлы, в частности марганец. Известно, что полная концентрация введенного марганца  $N_{Mn}^{от}$ , определенная методами активационного анализа или меченых атомов, примерно на 1.5—2 порядка больше его электроактивной доли  $N_{Mn}^{э}$ , вычисленной из измерений спектров [1—3]. Этот факт свидетельствует о нахождении большей части атомов Mn на неактивных стоках, скоплениях примесей, дефектов или в составе неактивных комплексов.

В данной работе методами DLTS, ИК поглощения, рентгеновской топографии и электронной микроскопии проведено комплексное исследование поведения электрически активного и неактивного марганца и участия в этих процессах O и C. Кислород и углерод — примеси роста всегда присутствуют в Si в значительной концентрации.

В качестве исходных образцов использовался *n*-Si с концентрацией оптически активного кислорода  $N_{O}^{от} \sim 10^{16}$  и  $(6.2 \div 13) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и углерода  $N_{C}^{от} = (2 \div 20) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, удельным сопротивлением  $\rho \sim 5$  Ом·см и плотностью дислокаций  $N_d \approx (0 \div 5) \cdot 10^3$  см<sup>-2</sup>. Методики изготовления образцов Si <Mn> и измерения спектров DLTS и ИК поглощения описаны в [4, 5].

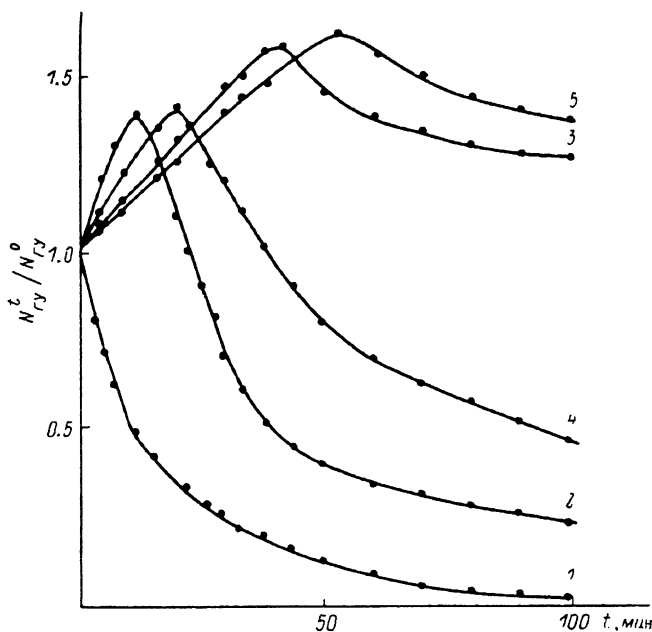
Измерения спектров DLTS показали, что эффективность образования глубоких уровней (ГУ), связанных с атомами марганца в состояниях Mn<sup>0</sup> и (Mn<sup>0</sup>)<sub>4</sub> в *n*-Si ( $E_c - 0.42$  и  $E_c - 0.54$  эВ с  $\sigma_n \sim 8 \cdot 10^{-15}$  и  $2 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup> соответственно [3]), зависит от содержания в образцах кислорода и углерода. Эффективность обра-

зования ГУ  $E_c - 0.13$  эВ ( $\sigma_n \sim 8 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>), связанного с парамагнитным центром Mn<sup>2+</sup>, не коррелирует с содержанием O и C.

Оказалось, что увеличение  $N_{O}^{opt}$  в исходных образцах стимулирует увеличение концентрации электроактивного марганца при диффузии.

Оценка содержания углерода  $N_{C}^{opt}$  до и после введения Mn и сравнение данных с  $N_{Mn}^{за}$  показали, что роль углерода противоположна: чем больше углерода в образце, тем меньше количество введенного электроактивного марганца.

Из спектров ИК поглощения видно, что как для кислорода, так и для углерода после введения Mn наблюдается уменьшение  $N_{O}^{opt}$  и  $N_{C}^{opt}$ . В отличие от кислорода, где  $\Delta N_{O}^{opt}$  составляло 10—50 % [4], для углерода эффект был сильнее и уменьшение концентрации оптически активного углерода превышало 1—1.5



Кинетика низкотемпературного отжига ГУ в Si(Mn).

$E_c$ , эВ: 1 — 0.13, 2, 4 — 0.42, 3, 5 — 0.54.  $N_{O}^{opt}$ , см<sup>-3</sup>: 1—3 —  $10^{18}$ , 4, 5 —  $2 \cdot 10^{18}$ .

порядка. Надо отметить, что уменьшение концентрации оптически активного углерода сопровождается сдвигом полосы поглощения от 607 к 620 см<sup>-1</sup>. Дополнительных полос в спектрах ИК поглощения в диапазоне 400—4000 см<sup>-1</sup> не наблюдалось. Такое сильное уменьшение  $N_{O}^{opt}$  и  $N_{C}^{opt}$  обусловлено именно диффузией Mn, так как в контрольных образцах (без Mn) такого уменьшения концентрации O и C не наблюдалось.

Уменьшение  $N_{O}^{opt}$  и  $N_{C}^{opt}$  может объяснить существующее различие между величиной предельной растворимости Mn в Si  $N_{Mn}^{общ}$  и концентрацией электроактивного марганца  $N_{Mn}^{за}$  [3]. Это различие между  $N_{Mn}^{общ}$  и  $N_{Mn}^{за}$  может быть связано с осаждением некоторой части растворенных атомов Mn на каких-либо стоках или связыванием марганца в нейтральные комплексы типа Mn—O или Mn—C. Для выяснения корреляции между поведением электроактивной доли Mn и межузельным кислородом проводились низкотемпературные отжижки (НТО) при 100—300 °С (см. рисунок). Видно, что в образцах с высокой концентрацией кислорода ( $N_{O}^{opt} \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>) отжиг глубоких уровней происходит в 3—4 раза медленнее, чем в Si с  $N_{O}^{opt} < 10^{16}$  см<sup>-3</sup> (кривые 2, 4 или 3, 5).

Методом сечений [6] была определена энергия активации отжига для каждого из уровней Mn. Для ГУ  $E_c - 0.42$  эВ она составляет  $0.50 \pm 0.02$  эВ; ГУ  $E_c - 0.54$  эВ оказался стабильнее и его энергия активации отжига —  $1.8 \pm 0.02$  эВ.

Обнаружено, что на начальной стадии отжига концентрация ГУ Mn увеличивается. Это сопровождается возвращением межузельного кислорода в опти-

чески активное состояние [4]. Таким образом, если действительно уменьшение  $N_O^{opt}$  и  $N_C^{opt}$  связано с образованием комплексов типа  $Mn-O$  или  $Mn-S$ , то именно распад их может обеспечивать описываемые явления, причем чем больше  $N_O^{opt}$  в образце, тем больше образовалось при диффузии  $Mn$  комплексов типа  $Mn-O$  и тем дольше идет их распад при НТО (см. рисунок).

Надо отметить, однако, что термообработка приводит к увеличению (возврату) оптически активного кислорода почти до исходной величины и не вызывает восстановления оптически активного углерода. По-видимому, комплекс типа  $Mn-O$  является более термостабильным.

Методами рентгеновской топографии и электронной микроскопии обнаружена дополнительная фаза в этих образцах  $Si$ , которая при типичном режиме введения  $Mn$  представляет собой частицы неопределенной формы (размером  $\sim 500 \text{ \AA}$ ), большой плотности ( $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) [7].

Были проведены предварительные эксперименты по определению фазового состава этих частиц методом рентгеноструктурного анализа (ДРОН-1М). На дифрактограммах обнаружен пик, параметры которого по таблицам ASTM совпадают с силикатом марганца (предположительно  $MnSiO_3$ ). Кроме того, в этих спектрах обнаружен пик, идентифицировать который пока не удалось, возможно, он связан с углеродными комплексами марганца.

#### Список литературы

- [1] Carlson O. R. // Phys. Rev. 1959. V. 104. N 4. P. 937—941.
- [2] Болтакс Б. И., Бахадырханов М. К., Городецкий С. М., Куликов Г. С. Компенсированный кремний. Л., 1972. 122 с.
- [3] Абдурахманов К. П., Лебедев А. А., Крейсль Й., Утамурадова Ш. Б. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 2. С. 213—216.
- [4] Абдурахманов К. П., Витман Р. Ф., Далиев Х. С., Лебедев А. А., Утамурадова Ш. Б. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 6. С. 1158—1159.
- [5] Абдурахманов К. П., Лебедев А. А., Утамурадова Ш. Б. // Вестн. Каракалпакского филиала АН УзССР. 1985. № 4. С. 10—13.
- [6] Parkins W. E., Dienes G. I., Brown F. W. // J. Appl. Phys. 1951. V. 22. P. 1012—1018.
- [7] Витман Р. Ф., Гусева Н. Б., Лебедев А. А., Ситникова А. А., Утамурадова Ш. Б. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 11. С. 2272—2274.

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

Получено 27.06.1989  
Принято к печати 10.07.1989

ФТП, том 23, вып. 12, 1989

## СВОЙСТВА СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ

### $InP\langle Yb \rangle$ и $InP\langle Er \rangle$

Мастеров В. Ф., Савельев В. П., Штельмах К. Ф., Захаренков Л. Ф.

В литературе по  $A^{III}B^V$ , легированных редкоземельными элементами (РЗ), утвердилось мнение, что предельная концентрация атомов РЗ в этих полупроводниках не превышает  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Это, безусловно, должно привести к ограничению возможных применений указанных материалов, в частности в качестве источников света на внутрицентровых  $f-f$ -переходах.

В настоящей работе мы показываем, что в принципе концентрация атомов РЗ в фосфиде индия, занимающих узельные положения в решетке, составляет по крайней мере  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (и, возможно, это не является пределом), что позволяет вновь поставить вопрос о возможности создания на основе этого материала когерентных и некогерентных источников излучения в области длин волн  $1 \div 1.5 \text{ мкм}$ .

Исследовался материал, полученный при синтезе из раствора-расплава. Легирование осуществлялось в процессе роста. Максимальные концентрации и