

- [4] Bremond G., Nouailhat A., Guillot G. — In: Gallium selenide a. Related Compounds. Bristol—London, 1982, p. 239—244.
- [5] Волокобинский Ю. М., Попов В. А., Разбегаев В. Н., Саморуков Б. Е. — В кн.: Тез. докл. IV Всес. семинара «Пути повышения стабильности и надежности микроэлементов и микросхем». М., 1987, с. 84.
- [6] Морозов А. Н., Бублик В. Т., Григорьева Т. П. — Кристаллография, 1984, т. 29, в. 4, с. 757—763.
- [7] Мильвидский М. Г., Пелевин О. В., Сахаров Б. А. Физико-химические основы полупроводниковых соединений. М., 1974. 392 с.
- [8] Полуизолирующие соединения  $A^{III}B^V$  / Под ред. Дж. Риса. М., 1984. 256 с.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина  
Минск

Получено 27.04.1988  
Принято к печати 28.07.1988

ФТП, том 23, вып. 3, 1989

## ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ НА ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ С ПРИМЕСЬЮ ЖЕЛЕЗА

Демидов Е. С., Карзанов В. В., Павлов П. В.

Известно, что ионная имплантация оказывает существенное влияние на систему дефектов в кристаллах кремния на расстояниях, в десятки и сотни раз превышающих пробеги внедряемых ионов [ $1-5$ ]. Однако пока не опубликовано каких-либо экспериментальных данных о зависимости дальнего действия эффектов при ионном облучении от интенсивности ионно-лучевой обработки. В данном сообщении приводятся результаты исследования влияния плотности ионного тока при имплантации на электрофизические свойства монокристаллических образцов  $Si\langle Fe \rangle$ . Исследования проводились с применением техники электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), измерением эффекта Холла и удельного сопротивления.

В качестве исходного материала использовались пластины кремния марки КДБ-35 толщиной 0.7 мм, вырезанные в плоскости (111), из которых изготавлились образцы размерами  $1.5 \times 0.5$  см. Легирование железом осуществлялось методом диффузии в вакуированных кварцевых ампулах из порошка  $Fe_2O_3$  в течение 1.5 ч при температуре  $1250^\circ C$  с последующей закалкой путем сбрасывания ампул в воду. Перед диффузионным отжигом с поверхности образцов для устранения дефектов шлифовки химическим травлением удалялся слой 50 мкм. После легирования образцы опять подвергались травлению для удаления неоднородно легированного слоя. Их окончательная толщина была 400 мкм.

Облучение исследуемых кристаллов производилось ионами аргона с энергией 40 кэВ и дозой  $F=10^{17} \text{ см}^{-2}$ , плотность тока ионов выбиралась в интервале

Влияние плотности ионного тока при имплантации  
на изменение электрофизических свойств кристаллов  
кремния, легированных железом (номера образцов  
соответствуют номерам кривых на рисунке)

№ образца	Тип проводимости	$j, \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$N_{\text{ион}}, \text{ см}^{-3}$ (90 К)	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (293 К)
1	p	0	$8 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^4$
2	n	0	$1.6 \cdot 10^{15}$	$1.86 \cdot 10^5$
3		$1.25 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^{15}$	$3.17 \cdot 10^4$
4		$3.13 \cdot 10^{13}$	$9 \cdot 10^{14}$	$1.52 \cdot 10^5$
5		$6.94 \cdot 10^{13}$	$1.5 \cdot 10^{15}$	$5.26 \cdot 10^4$
6		$1.04 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{15}$	$9.92 \cdot 10^8$

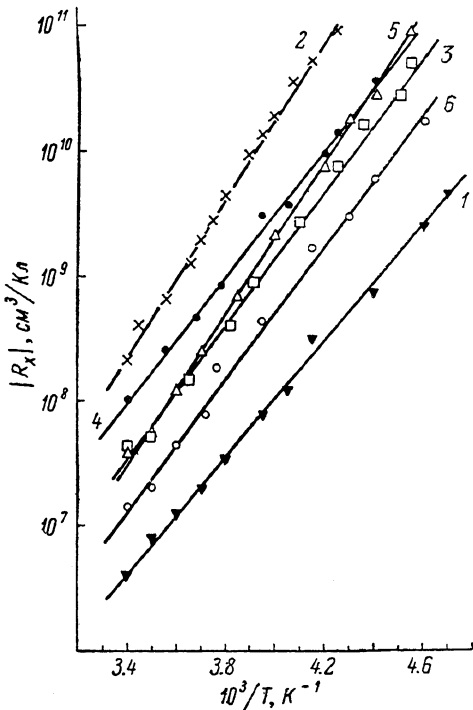
от  $1.25 \cdot 10^{13}$  до  $1.04 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Для улучшения теплоотвода образцы приклеивались к массивной стальной мишени индий-галлиевой пастой, благодаря чему их температура при имплантации не превышала  $50^\circ\text{C}$ . После имплантации с облученной стороны химически удалялся слой около  $5$   $\mu\text{м}$ .

Электрические измерения проводились с необлученной стороны кристаллов. Запись спектров ЭПР осуществлялась на  $3$ -сантиметровом спектрометре при  $90$   $\text{K}$  вместе с эталоном интенсивности, в качестве которого использовался порошок  $\text{MgO}$  с примесью марганца.

Перед ионной имплантацией легированные железом образцы выдерживались при комнатной температуре в течение  $3$  недель, для того чтобы процессы распада пересыщенного твердого раствора  $\text{Si-Fe}$ , сопровождающиеся образованием комплексов, кластеров и т. п. и вызывающие деградацию электрических свойств материала [6, 7], в основном завершились. Для эксперимента была отобрана серия образцов, которые после диффузии железа обладали одинаковыми параметрами (удельное сопротивление  $\rho$ , постоянная Холла  $R_H$ , концентрация парамагнитных центров железа  $N_{\text{мп}}$ ).

Экспериментальные данные о влиянии облучения аргоном на величины  $\rho$  и  $N_{\text{мп}}$  исследуемых кристаллов при различных плотностях ионного тока представлены в таблице. Температурные зависимости  $R_H$  для тех же образцов показаны на рисунке.

Видно, что после облучения  $n$ -тип проводимости сохранился, а  $\rho$  и  $R_H$  зна-



Влияние ионного облучения на температурные зависимости постоянной Холла в кристаллах  $\text{Si}\langle\text{Fe}\rangle$  (номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице).

Зависимость  $R_H(T)$ , полученная: 1 — через  $2$  ч после окончания легирования железом, 2 — после хранения образцов в течение  $3$  недель при комнатной температуре (перед облучением), 3—6 — на образцах, подвергнутых имплантации аргона с различной плотностью ионного тока (см. таблицу).

чительно уменьшились, т. е. увеличилась концентрация электронов в зоне проводимости. При этом наибольшие изменения (более чем в  $20$  раз) произошли в образце, который подвергался облучению с максимальной плотностью тока  $j=1.04 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Величина  $N_{\text{мп}}$  изменялась не так существенно: в последнем случае ее значение увеличилось в  $2.5$  раза, в остальных случаях было слабое уменьшение. Последовательное стравливание слоев (необлученная сторона закрывалась химически стойким лаком) практически не изменяло значений  $\rho$ ,  $R_H$ ,  $N_{\text{мп}}$ . Окончательная толщина образцов после этих операций была около  $40$   $\mu\text{м}$ .

Приведенные выше результаты подтверждают наличие перестройки дефектной системы далеко за пределами зоны торможения ионов при имплантации. Установлено, что на расстояниях до  $400$   $\mu\text{м}$  параметры кремния изменяются равномерно по глубине за имплантированным слоем. Это изменение сильно и немонотонно зависит от плотности ионного тока. Причем в отличие от данных [4] наблюдалось не только исчезновение изолированных ионов железа за счет комплексообразования, но и обратное явление при большой плотности ионного тока. Это свидетельствует о существовании по крайней мере двух процессов. Во-первых, как предполагалось в [4], происходит ускорение комплексообразования ионов железа с акцепторными дефектами кристалла из-за увеличения скорости миграции этих ионов в результате модуляции активационного барьера диффузии излучаемыми из зоны торможения упругими волнами колебаний ре-

шетки. Важная роль такого механизма рассмотрена в [8, 9]. Во-вторых, те же упругие волны могут модулировать активационный барьер, определяющий связь иона железа в комплексе, и при большой плотности ионного тока способствовать распаду этих комплексов.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Павлов П. В. — *Вопр. ат. науки и техн., сер. Физика радиац. поврежд. и радиац. матер.*, 1984, в. 3 (31), с. 95—102.
- [2] Pavlov P. V., Tetelbaum D. I., Skupov V. D., Semin Yu. A., Zorina G. V. — *Phys. St. Sol. (a)*, 1986, v. 94, N 1, p. 395—402.
- [3] Калинушкин В. П., Кузнеценко Т. А., Маненков А. А. и др. — В кн.: Тез. докл. I Всес. конф. «Физические и физико-химические основы микроэлектроники». Вильнюс, М., 1987, с. 70—71.
- [4] Павлов П. В., Демидов Е. С., Зорина Г. В. — *ФТП*, 1987, т. 21, в. 6, с. 984—988.
- [5] Демидов Е. С., Зорина Г. В., Карзанов В. В., Павлов П. В. — В кн.: Тез. докл. Всес. конф. «Ионно-лучевая модификация материалов». Черноголовка, 1987, с. 125.
- [6] Омеляновский Э. М., Фистуль В. П. *Примеси переходных металлов в полупроводниках*. М., 1983. 192 с.
- [7] Amsterlaan C. A. J. — *Lect. Not. Phys.*, 1983. Proc. Int. School. Matrafured, Sept. 13—17, 1982, p. 111—119.
- [8] Павлов П. В., Семин Ю. А., Скупов В. Д., Тетельбаум Д. И. — *ФТП*, 1986, т. 20, в. 3, с. 503—507.
- [9] Семин Ю. А., Скупов В. Д., Тетельбаум Д. И. — В кн.: Тез. докл. XVII Всес. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М., 1987, с. 104.

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

Получено 10.03.1988  
Принято к печати 2.08.1988

*ФТП, том 23, вып. 3, 1989*

## О ВЛИЯНИИ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК НА СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Батырев В. А., Лукашевич П. Г.

Ширина запрещенной зоны в полупроводниках зависит от концентрации электронно-дырочных (ЭД) пар. Поэтому можно ожидать, что и контур спектра межзонных переходов будет зависеть от вида распределения ЭД пар по кристаллу.

В данном сообщении показано, что одной из возможных причин деформации контуров спектров рекомбинационного излучения (РИ) электронно-дырочной плазмы (ЭДП) в полупроводниках может быть и неоднородное распределение ЭД пар в кристаллах.

Предположим, что распределение ЭД пар является неоднородным только по глубине кристалла  $l$ . Тогда в случае разрешенных прямых межзонных переходов (см. [1]) спектр спонтанного излучения ЭДП будет иметь вид

$$I(h\nu) \sim \int_0^{\infty} S [h\nu - E'_g(l)]^{1/2} \left\{ \exp \left[ \frac{m_h^*}{m_e^* + m_h^*} \frac{h\nu - E'_g(l)}{kT} - \frac{\mu_e(l)}{kT} \right] + 1 \right\}^{-1} \times \\ \times \left\{ \exp \left[ \frac{m_e^*}{m_e^* + m_h^*} \frac{h\nu - E'_g(l)}{kT} - \frac{\mu_h(l)}{kT} \right] + 1 \right\}^{-1} dl, \quad (1)$$

где  $E'_g(l)$  — ширина запрещенной зоны в возбужденной области кристалла,  $m_e^*$ ,  $m_h^*$ ,  $\mu_e(l)$ ,  $\mu_h(l)$  — эффективные массы и химические потенциалы электронов и дырок, отсчитанные от экстремумов соответствующих зон,  $S$  — площадь центральной части пятна, с которой регистрируется излучение.

Ширина запрещенной зоны в возбужденной области кристалла  $E'_g(l) = E_g^0 + \Delta E_g(l)$ , где  $E_g^0$  — ширина запрещенной зоны в невозбужденной области. Согласно известным представлениям [2], уменьшение ширины запрещен-