

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ УПОРЯДОЧЕНИЯ ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНОЙ СИСТЕМЫ КРЕМНИЯ

Квасов Н. Т., Ионикас Л. Ю., Ярашюнас К. Ю.

Методами динамических решеток и вынужденных колебаний исследована эволюция упорядочения примесно-дефектной системы кремния при световом некогерентном отжиге. Обнаружена корреляция между электрическими и механическими характеристиками монокристаллов на стадии отжига. Эффект объясняется изменением миграционной способности дислокаций, коррелирующей с рекомбинационной активностью примесно-дефектных скоплений.

1. *Введение.* Исследования механизмов образования и миграции дефектов при ионной бомбардировке, их структуры и распределения, а также процесса эволюции дефектно-примесной системы при различных видах светового воздействия приобретают особую важность на современном этапе моделирования физических процессов, происходящих при упорядочении дефектов. Наряду с известными методиками контроля несовершенства структуры [1] перспективными являются оптические и нелинейно-оптические методы исследования дефектности среды.

Интересную возможность в решении таких задач представляет методика динамических решеток, основанная на выявлении дифракции света на светонаведенной решетке [2]. Сущность методики заключается в освещении исследуемого полупроводника импульсом интерференционного поля мощного лазерного излучения, приводящего к формированию периодической структуры возбужденных состояний (в данном случае — неравновесных носителей заряда), и наблюдении дифракции света на таковой структуре в силу изменения оптических свойств среды в возбужденных областях исследуемого материала. В закономерностях дифракции света (угловых, временных и экспозиционных характеристиках дифрагированного излучения) отражены фотоэлектрические свойства исследуемого полупроводника: концентрация электрон-дырочных пар, время жизни, коэффициент диффузии носителей заряда, механизмы их генерации и рекомбинации. Эксперименты с ионно-легированным кремнием показали, что в обобщенной характеристике динамической решетки — в значении ее дифракционной эффективности — отражены степень несовершенства кристаллической структуры полупроводника и ее упорядочение при отжиге [3], однако механизмы взаимосвязи оптических и электрических характеристик в примесно-дефектных структурах подлежат более детальному исследованию.

Целью данной работы явилось исследование дефектно-примесной системы кремния методом динамических решеток и методом вынужденных изгибных колебаний пластин бездислокационного кремния КДБ-10 (111) и КДБ-20 (100) (выращенных по методу Чохральского с концентрацией кислорода  $\approx 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, толщиной  $360 \pm 20$  мкм и диаметром 76 мм). Дефектно-примесная система формировалась путем легирования пластин ионами фосфора (доза имплантации 500 мкКл/см<sup>2</sup>, энергия ионов 30 кэВ) или облучением  $\gamma$ -квантами (доза радиации  $10^7$  Р, энергия квантов 1.25 МэВ). Облученные пластины подвергались действию импульсов некогерентного излучения секундной длительности в диапазоне 1—13 с, что обеспечивало изменение температуры отжигаемых пластин

до 1300 К. Для сравнения исследуемых характеристик кремния производился отжиг таких же образцов в среде сухого аргона (при  $T=1300$  К в течение 30 мин).

2. *Методика и техника эксперимента.* Исследование характеристик дефектно-примесной системы методом динамических решеток осуществлялось при помощи экспериментальной установки (рис. 1), содержащей твердотельный импульсный лазер, детекторы лазерного излучения и измерительную систему для сбора и обработки данных на базе микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28». Решетки с периодом 20–25 мкм записывались в приповерхностном слое пластин излучением второй гармоники лазера ( $\lambda_2=0.53$  мкм), сильно поглощаемым в монокристалле кремния ( $\alpha=8 \cdot 10^3$  см $^{-1}$ ). Слабо поглощаемый луч исходной гармоники лазера ( $\lambda_1=1.06$  мкм), содержащийся в одном из плечей интерферометра, дифрагировал на периодической светонаведенной структуре неравновесных носителей заряда (ННЗ) в силу модуляции ими показателя преломления полупроводника на величину  $|\Delta n| \approx \approx 10^{-21} \Delta N \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$ . В эксперименте регистрировался уровень возбуждения  $I_0$  на длине волны  $\lambda_2$ , интенсив-

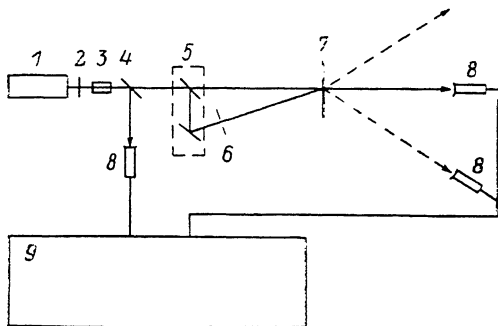


Рис. 1. Схема экспериментальной установки исследования светонаведенной дифракции света.

1 — лазер ЛТИПЧ-7, 2 — нейтральные светофильтры, 3 — нелинейный кристалл второй гармоники, 4, 5 — делители света, 6 — светофильтры СЗС, 7 — исследуемый образец, 8 — детекторы излучения, 9 — система автоматического сбора и обработки данных на микро-ЭВМ.

ности дифрагированного в первый порядок  $I_1$  и прошедшего через образец  $I_T$  лучей на длине волны  $\lambda_1$ . Программным путем обеспечивались сбор данных эксперимента при заданном постоянном уровне возбуждения  $I_0 \pm 5\%$  и расчет дифракционной эффективности  $\eta_1 = I_1/I_T$ , усредненной по результатам 20–30 измерений в различных точках пластины.

Физическая сущность используемых методик предполагает отражение состояния дефектно-примесной системы в электрофизических параметрах кремния. В методике динамических решеток эффективность дифракции  $\eta_1$  связана с изменением модулирующей концентрации ННЗ  $\Delta N = N_{\max} - N_{\min}$  соотношением [4]

$$\eta_1 = J_1^2 \left( \frac{\pi}{\lambda_1} n_{eh} \int_0^d \Delta N dz \right) \approx \left[ \frac{\pi}{2\lambda_1} n_{eh} 2\alpha_2 \sqrt{I_{01} I_{02}} \int e^{-\alpha_2 z} dz \int_0^t f(t - \xi) e^{-\xi/\tau_e} d\xi \right]^2, \quad (1)$$

где  $J_1$  — функция Бесселя,  $d$  — толщина образца,  $\alpha_2$  — коэффициент поглощения излучения на длине волны  $\lambda_2$ , записывающей решетку,  $\lambda_1$  — длина волны считывающего решетку излучения,  $n_{eh}$  — коэффициент модуляции показателя преломления,  $f(t)$  — временная форма импульса возбуждения,  $\tau_e$  — время распада периодической структуры ННЗ. Установлено, что коэффициент фотоактивного поглощения  $\alpha_2$  и время распада динамической решетки  $\tau_e$  (последнее обусловлено процессами диффузии и рекомбинации ННЗ) определяют эффективность дифракции света на динамической решетке в кремнии [5], а уменьшение  $\eta$  в результате ионного легирования следует связывать в основном с изменением параметров  $\tau_e$  и  $\alpha_2$ .

Изменение модуля упругости (дефект модуля) исследовалось путем анализа резонансных частот  $\Omega$  изгибных колебаний полупроводниковых образцов [5]. Вычислялся дефект модуля упругости по формуле [5, 6]

$$\frac{\Delta E}{E_0} = (\Omega^4 - \Omega^2) [E_0 d^3 + 12F_1 (E^* - E_0)] / 12\Omega^2 E_0 F_2, \quad (2)$$

где

$$F_1 = \int_0^{d/2} \left( z - \frac{d}{2} \right)^2 \exp \left( -\frac{z^2}{2z_j^2} \right) dz,$$

$$F_2 = \int_{-d/2}^0 \left(z + \frac{d}{2}\right)^2 \exp\left(-\frac{z^2}{2z_j^2}\right) dz.$$

Здесь  $\Omega$ ,  $\Omega'$  — резонансные частоты образцов до и после имплантации,  $d$  — толщина пластин,  $E_0$ ,  $E^*$  — модули упругости приповерхностного слоя активной и обратной (неимплантированной) сторон пластины,  $z_j^2$ ,  $z_j'^2$  — дисперсии в распределении модулей упругости на активной и обратной сторонах пластин соответственно. Установлено, что дефект модуля кристалла при радиационном воздействии обусловлен в основном двумя причинами: изменением миграционной способности дислокаций, связанной с закреплением их точечными дефектами [7, 8], и (или) деформацией кристаллической решетки [9]. Величина деформации в случае ионного легирования может достигнуть значительных величин:  $\Delta a/a \approx 10^{-3}$  (здесь  $a$  — постоянная кристаллической решетки кремния).

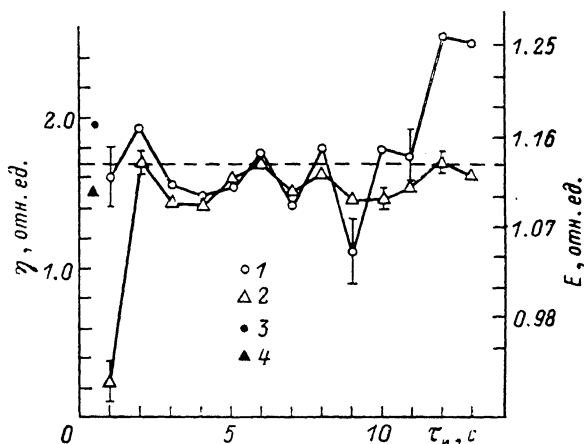


Рис. 2. Зависимость модуля упругости  $E$  (1) и дифракционной эффективности  $\eta_1$  (2) от длительности импульса излучения  $\tau_n$  при отжиге  $\gamma$ -облученного кремния КДБ-10.

3, 4 — значения модуля упругости и дифракционной эффективности легированной пластины после термического отжига; штриховые линии на рис. 2—4 — значения модуля упругости исходного монокристалла.

3. *Результаты и их обсуждение.* Сформированная облучением  $\gamma$ -квантами дефектная система кремния содержит в основном нарушения структуры одного типа — точечные радиационные дефекты. Деформация кристаллической решетки при указанных дозах и энергиях, как правило, отсутствует. В данных образцах изменения дефектной системы при последовательном отжиге представлены на рис. 2 в виде зависимостей дифракционной эффективности  $\eta_1$  и модуля упругости  $E = E_0 + \Delta E$  от длительности импульса термообработки. Сопоставление данных зависимостей указывает на то, что изменение упругих свойств и фотоэлектрических параметров кристалла связано и обусловлено процессами взаимодействия дислокаций и точечных дефектов. Основной причиной изменения модуля упругости в данном случае является изменение миграционной способности дислокаций за счет закрепления их точечными дефектами [8]. При этом изменяется концентрация активных центров рекомбинации, что влияет на генерацию ННЗ, их время жизни и, согласно (2), на эффективность дифракции. Так как в данных образцах кремния не имеется краевых дислокаций (при селективном травлении ямок травление не обнаружено), то следует предположить, что взаимодействие радиационных дефектов происходит с винтовыми дислокациями или с дислокационными петлями. В интервале  $\tau_n \leq 2$  с параметр  $\eta_1$  испытывает скачок почти на порядок, что соответствует отжигу А-центров и К-центров [10] и коррелирует с результатами по изохронному термическому отжигу [11].

При дальнейшем увеличении экспозиции отжига наблюдается осциллирующий характер в поведении  $E$  и  $\eta_1$ , который обусловлен, по-видимому, конкуренцией процессов закрепления дислокаций точечными дефектами и их отрыва при импульсных нагрузках. Корреляция в изменении параметров обусловлена тем, что отрыв дислокаций от стопорных точек приводит, с одной стороны, к уменьшению модуля упругости (относительно исходного значения), а, с другой стороны, — к освобождению дополнительных центров рекомбинации, способствующих уменьшению дифракционной эффективности. При закреплении дислокаций точечными дефектами последние частично теряют свои свойства

рекомбинационных центров из-за изменения величины потенциальных барьеров вокруг их, а в результате этого  $E$  и  $\eta_1$  возрастают.

Размножение дислокаций и образование линий скольжения при экспозициях  $\tau_n \geq 11$  с приводит к резкому возрастанию модуля упругости с переходом через уровень исходного значения  $E_0 = 1.13 \cdot 10^{11}$  Па. Эффективность дифракции, однако, при этом изменяется мало, хотя и прослеживается тенденция к ее возрастанию. Таким образом, можно предположить, что дислокации в чистом виде практически не влияют на величину дифракционной эффективности.

Сформированная в результате ионной «бомбардировки» дефектно-примесная система имеет весьма сложный состав (дислокации различного типа, дефекты упаковки,

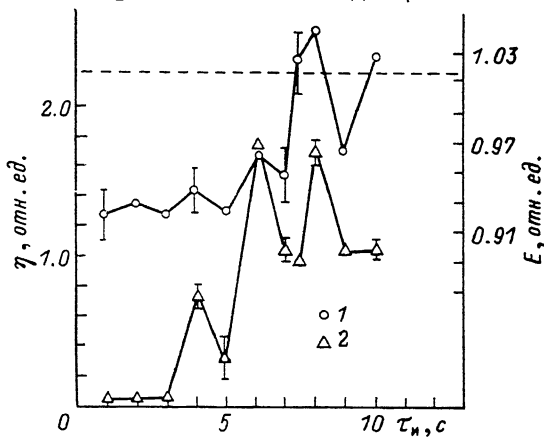
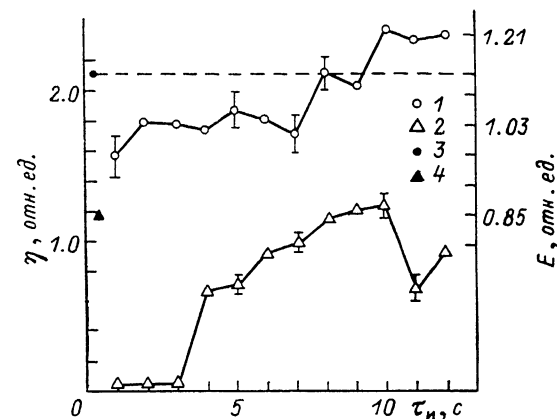


Рис. 3. Зависимость модуля упругости  $E$  (1) и дифракционной эффективности  $\eta_1$  (2) от длительности импульса  $\tau_n$  излучения при отжиге ионно-имплантированного кремния КДБ-20.

крупные комплексы, точечные дефекты, их простейшие комбинации с атомами примеси и т. п.). В данном случае экспозиционные зависимости поэтапного отжига ионно-легированных образцов (рис. 3, 4) имеют более сложный характер, однако общие закономерности в динамике изменений  $\eta_1$  и  $E$  также можно проследить. Как и в случае с облученным  $\gamma$ -квантами кремнием, имеет место корреляция измеряемых параметров. Характер зависимостей, осциллирующих с возрастанием экспозиции, свидетельствует о конкуренции процессов отрыва и закрепления дислокаций точечными дефектами на общем



фоне их размножения при одновременном уменьшении величины деформации решетки (возрастание  $\eta_1$ ) и концентрации точечных дефектов (возрастание  $E$ ). При  $\tau_n = 8$  с (КДБ-10) или  $\tau_n = 8-10$  с (КДБ-20) величина модуля упруго-

Рис. 4. Зависимость модуля упругости  $E$  (1) и дифракционной эффективности  $\eta_1$  (2) от длительности импульса  $\tau_n$  излучения при отжиге ионно-легированного кремния КДБ-10.

3, 4 — то же, что и на рис. 2.

сти переходит через уровень исходного значения (т. е. меняет знак), а эффективность дифракции достигает максимального значения. Дополнительные исследования (рентгено-дифракционный анализ, исследование холловской подвижности, удельного слоевого сопротивления [<sup>12</sup>]) показывают, что в данных условиях достигаются полная активация и отжиг дефектов.

Сравнение двух кристаллографических ориентаций показывает, что амплитуда осцилляций величин  $E$  и  $\eta_1$  для образцов с ориентацией (100) значительно больше, чем для образцов с ориентацией (111). В рамках рассмотренных выше механизмов изменения параметров  $E$  и  $\eta_1$  этот эффект можно интерпретировать как результат значительно большего для ориентации (100) количества точечных дефектов-стопоров, участвующих в закреплении и освобождении дислокаций при импульсных термоупругих нагрузках на кристалл полупроводника.

Полученные результаты, таким образом, свидетельствуют о том, что параметр дифракционной эффективности  $\eta_1$  отражает эволюцию дефектно-примесной системы в легированном полупроводнике при отжиге. При этом оказывается возможным установить режим светового некогерентного отжига, соответствующий активации примеси и структурному упорядочению дефектов.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 475 с.
- [2] Vaitkus J., Jarašiūnas K., Gaubas E., Jonikas L., Pranaitis R., Subačius L. — IEEE J. Quant. Electron., 1986, v. QE-22, N 8, p. 1298—1305.
- [3] Квасов Н. Т., Буткус В., Вайткус Ю., Лабунов В. А., Ярашюнас К. — В кн.: Тез. докл. Межд. конф. «Ионная имплантация в полупроводниках и других материалах». Вильнюс, 1983, с. 81—82.
- [4] Вайткус Ю., Ярашюнас К., Ионикас Л., Амстибовский В. — Лит. физ. сб., 1986, т. 26, № 4, с. 462—468.
- [5] Вайткус Ю., Гаубас Э., Ярашюнас К., Михайлов В. — ФТП, 1983, т. 17, в. 9, с. 1552—1556.
- [6] Лабунов В. А., Квасов Н. Т., Полонин А. К. — А. С., № 1087779. Оpubл. в БИ, № 15, 1984.
- [7] Лехницкий С. Г. — Прикладн. матем. и механ., 1981, т. 5, в. 1, с. 85—89.
- [8] Никаноров С. П., Кардашев Б. К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М., 1985. 250 с.
- [9] Лабунов В. А., Квасов Н. Т., Полонин А. К., Прохоренко Н. Л. — В кн.: Тез. докл. XV Всес. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М., 1985, с. 111.
- [10] Мудрый А. В., Юхневич А. В. — ФТП, 1973, т. 7, в. 1, с. 170—172.
- [11] Мудрый А. В., Юхневич А. В. — ФТП, 1974, т. 8, в. 7, с. 1351—1355.
- [12] Прохоренко Н. Л., Квасов Н. Т., Полонин А. К. — В кн.: Тез. докл. IV совещ. по дефектам структуры в полупроводниках. Новосибирск, 1984, с. 178.

Вильнюсский государственный  
университет им. В. Капсукаса

Получена 13.04.1987  
Принята к печати 15.09.1987