

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ КРЕМНИЯ,
ОБЛУЧЕННОГО РЕАКТОРНЫМИ НЕЙТРОНАМИ
ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Карумидзе Г. С., Трахброт Б. М.

Влияние низких температур облучения нейтронами реактора на близкраевое поглощение в кремнии, выращенном по методу зонной плавки, и на кинетику отжига радиационных дефектов по изменению удельного сопротивления показано в работах [1, 2]. Представляет интерес изучение особенностей в поведении кислорода в кристаллах кремния, подвергаемых облучению нейтронами при криогенных температурах, в сравнении с кристаллами, облучаемыми при высоких температурах, а также влияния кислорода при низкотемпературном облучении на структуру разупорядоченных областей (РО).

В данной работе приведены результаты исследований спектров поглощения кристаллов Si, содержащих кислород в концентрации 10^{16} см⁻³, и кристаллов, выращенных по методу Чохральского, с концентрацией кислорода $1 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Кристаллы облучались в низкотемпературном канале реактора при 100 К. Аналогичные образцы облучались без охлаждения. При этом за счет гамма-нагрева достигались достаточно высокие температуры. Флюенс тепловых нейтронов составлял $(1 \div 2) \cdot 10^{18}$ н/см² при соотношении тепловых нейтронов к быстрым ($E \geq 0.5$ МэВ) нейтронам 2 : 1. Концентрация междузельного кислорода регистрировалась по полосе поглощения при 9.1 мкм с использованием калибровочного коэффициента, предложенного в работе [3].

Изучалось близкраевое поглощение, возникающее после облучения кристалла Si быстрыми нейтронами и обусловленное дивакансиями в ядре РО [4, 5]; параллельно исследовалось поведение кислорода. Интенсивность близкраевого поглощения и скорость пострадиационного отжига РО значительно выше у кристаллов, облученных при 100 К, по сравнению с облучавшимися без охлаждения, что свидетельствует о разной структуре РО [1]. Следует считать, что высокая интенсивность близкраевого поглощения монокристалла кремния, облученного при 100 К, связана с большей концентрацией дивакансий в ядре РО относительно кристалла, облученного без охлаждения. Большая скорость отжига обусловлена тем, что примесно-дефектная оболочка РО также зависит от температуры облучения. В спектрах облученных при 100 К кристаллов Si, выращенных по методу Чохральского и содержащих высокую концентрацию кислорода, интенсивность близкраевого поглощения в пределах ошибки измерения не отличается от кристаллов зонной плавки. Следовательно, примесь кислорода не влияет на структуру ядра РО, возникающей при облучении в указанных условиях.

Сравнение кристаллов кремния, выращенных по методу Чохральского и облученных при 100, 460, 570 К; а также при $T \geq 720$ К, показало, что уменьшение концентрации междузельного кислорода растет с повышением температуры облучения. Между тем концентрация А-центров, регистрируемых по полосе при 12 мкм, максимальна после облучения при 460 К; в кристаллах же, облученных при $T=720$ К, А-центры отсутствуют. Следовательно, с повышением температуры облучения образуются более сложные комплексы, содержащие кислород. С повышением скорости миграции подвижных радиационных де-

фектов и ростом температуры увеличивается вероятность образования сложных комплексов.

Скорость пострadiационного отжига ядра РО выше в кристаллах с большим содержанием кислорода. В образцах, облученных при 100 К, отжиг ядра РО в интервале температур 200—250 °С сопровождается значительным уменьшением концентрации кислорода и ростом количества А-центров. Надо полагать, что дообразование А-центров происходит на периферии РО. Необходимо отметить, что при указанных флюенсах нейтронов РО заполняют большую часть объема кристалла Si [6]. Кривые изохронного отжига близкраевого поглощения (в отн. ед.) в образцах, облученных при разных температурах, представлены на рис. 1. На рис. 2 показаны кривые отжига кислорода и А-центров на тех же

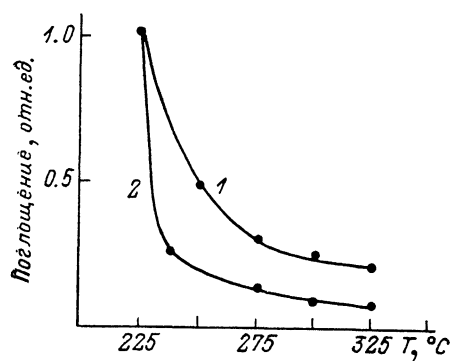


Рис. 1. Изменение близкраевого поглощения (в отн. ед.) в кремнии при изохронном отжиге.
 $\lambda=2.2$ мкм; образец облучен при T , К: 1 — 460, 2 — 100.

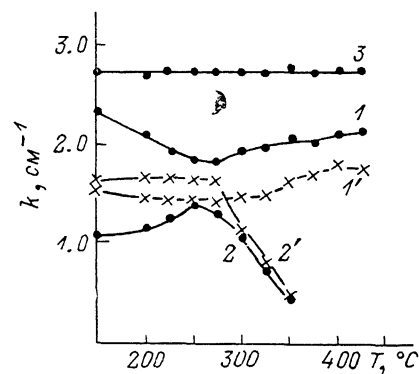


Рис. 2. Изменения коэффициентов поглощения в максимумах полос $\lambda=9.1$ мкм (1, 1', 3) и $\lambda=12$ мкм (2, 2') при изохронном отжиге образцов.

Образец облучен при T , К: 1, 2 — 100, 1', 2' — 460; 3 — необлученный образец. Первая точка на каждой кривой (лежащая на оси ординат) соответствует измерениям после выдерживания облученных образцов при комнатной температуре в течение времени, необходимого для снижения наведенной радиоактивности.

образцах, а также поведение кислорода при отжиге в контрольном необлученном образце. Длительность отжига при каждой температуре составляла 20 мин. Наиболее интенсивный отжиг А-центров в интервале температур 275—350 °С в кристалле; облученном при 100 К, сопровождается восстановлением междоузельного кислорода. В образце же, облученном при 460 К, этого не наблюдается. Исчезновение А-центров сопровождается появлением в спектре полосы поглощения при 11.2 мкм. Согласно работе [7], ответственным за эту полосу является комплекс, состоящий из двух атомов кислорода и вакансии. Концентрация этих дефектов в кристалле, облученном без охлаждения, на 100 % превышает концентрацию тех же дефектов, возникающих в кристалле, облученном при 100 К.

Таким образом, особенности структуры ядра и периферии РО в монокристаллах кремния, облученных при криогенной температуре, обуславливают иной характер пострadiационного отжига дефектов, в частности уменьшают возможность образования сложных комплексов кислород—вакансия.

Авторы выражают признательность Э. Л. Андроникашвили за внимание к работе.

Л и т е р а т у р а

- [1] Карумидзе Г. С., Трахброт Б. М., Воронов И. Н., Гринштейн П. М. — Изв. АН СССР, Неорг. матер., 1986, т. 22, в. 9, с. 1560—1561.
- [2] Карумидзе Г. С., Андреевский К. Н. — ФТП, 1987, т. 21, в. 5, с. 862—865.
- [3] Александрова Г. И., Ильин М. А., Коварский В. А., Федотова Н. П., Холодный Л. П. — Метрология, 1982, № 7, с. 53—59.
- [4] Коваль Ю. П., Мордкович В. Н., Тэмпер Э. М., Харченко В. А. — ФТП, 1972, т. 6, в. 7, с. 1317—1322.

- [5] Ухин Н. А. — ФТП, 1972, т. 6, в. 5, с. 931—933.
 [6] Стейн Х. — В кн.: Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников. М., 1982, с. 122—144.
 [7] Corbett Y. W., Watkins G. D., McDonald R. A. — Phys. Rev., 1964, v. 135, p. 1381.

Институт физики АН ГССР
Тбилиси

Получено 15.12.1987
Принято к печати 6.05.1988

ФТП, том 22, вып. 10, 1988

ИМПУЛЬСНЫЙ ОТЖИГ ЯДЕРНО ЛЕГИРОВАННОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Коршунов Ф. П., Соболев Н. А., Колин Н. Г.,
Кудрявцева Е. А., Прохоренко Т. А.

Импульсный отжиг (ИО) в секундном диапазоне длительностей с помощью галогенных ламп накаливания широко применяется в технологии ионной имплантации арсенида галлия [1]. В работе [2] была показана принципиальная возможность получения положительного результата при ИО ядерно легированного арсенида галлия (ЯЛАГ). В настоящей работе методами эффекта Холла и фотолюминесценции (ФЛ) исследуются происходящие при ИО процессы удаления радиационных дефектов (РД) и электрической активации трансмутированных примесей Se и Ge в ЯЛАГ.

В качестве исходных для ядерного легирования использовались кристаллы арсенида галлия, выращенные методом Чохральского, с концентрацией носителей $n=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижностью $\mu=5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 300 К и степенью компенсации $K=0.6$. Ядерное легирование проводилось с помощью облучения при 60 °С нейтронами реактора с отношением потоков тепловых нейтронов к быстрому около 10. Флюенсы нейтронов подбирались так, чтобы получить суммарные концентрации легирующих примесей Se и Ge $N \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (I группа образцов) и $N \approx 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (II группа образцов). ИО образцов толщиной $1 \div 2 \text{ мм}$ проводился на воздухе импульсами излучения галогенных ламп длительностью 10 с при индуцированных температурах 600—1000 °С с шагом 100 °С. После ИО образцы вновь полировались и химически травились для удаления деградированного слоя. Контрольный отжиг слитков ЯЛАГ в печи (ОП) в течение 20 мин при 900 °С проводился в отпаянных ампулах при равновесном давлении паров мышьяка [3], после чего из слитков вырезались образцы, которые также полировались и травились. Измерения ФЛ проводились при 4.2 К на установке, описанной в [4], измерения эффекта Холла — в диапазоне температур $77 \div 300 \text{ К}$ по стандартной методике.

В результате контрольного ОП образцы имели следующие параметры: I группа — $n=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\mu=3600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $K=0.5 \div 0.6$; II группа — $n=1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\mu=1650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $K=0.75 \div 0.8$. В случае ИО образцы обеих групп остаются высокоомными при $T_{\text{ИО}} \leq 800 \text{ °С}$.

Для образцов I группы наилучшие значения электрофизических параметров ($n=2.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\mu=4700 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $K=0.25$) достигаются при $T_{\text{ИО}}=900 \text{ °С}$, причем подвижность и степень компенсации заметно превосходят параметры, получаемые в результате ОП. При повышении $T_{\text{ИО}}$ до 1000 °С падают концентрация и подвижность носителей ($n=1.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\mu=4140 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$), растет степень компенсации ($K=0.3$). При $T_{\text{ИО}}=600 \text{ °С}$ разрешенных полос ФЛ не наблюдается. При $T_{\text{ИО}}=700 \text{ °С}$ появляется слабая полоса 1.484 эВ (переход зона проводимости—акцептор Si_{As} [5]). При $T_{\text{ИО}}=800 \text{ °С}$ появляются экситонная полоса 1.517 эВ, повторения полосы 1.484 эВ с испусканием одного (полоса 1.448 эВ) и двух (1.412 эВ) LO-фононов и примесно-дефектная полоса 1.3 эВ. Спектры ФЛ для $T_{\text{ИО}} \geq 800 \text{ °С}$ представлены на рисунке, а. При повышении $T_{\text{ИО}}$ до 900 °С интенсивность полосы 1.484 эВ растет на порядок, добавляются полоса