

Координаты	Преобразование	Потенциалы, допускающие полное либо частичное разделение переменных
Биполярные $x = \frac{\alpha \sin \nu \cos \varphi}{\cos h\mu + \cos \nu},$ $y = \frac{\alpha \sin \nu \sin \varphi}{\cos h\mu + \cos \nu},$ $z = \frac{\alpha \sin \mu}{\cos h\mu + \cos \nu}$	$\sin^{-1/2} \nu S_{\theta} S_{\varphi} \alpha,$ $\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\cos h\mu \sin \nu}{\cos h\mu \cos \nu + 1} \right)$	$V(t) + \left(\frac{\cos h\mu + \cos \nu}{\sin \mu} \right) V(\varphi),$ $V(t) + V(\mu, \nu)$

Список литературы

1. Багров В. Г., Шаповалов В. Н. и др. // Изв. вузов СССР. Физика. 1973. № 7. С. 95; 1975. № 4. С. 29; 1975. № 7. С. 6; 1975. № 8. С. 73; 1975. № 9. С. 106; 1977. № 6. С. 46; 1977. № 7. С. 105; 1978. № 2. С. 13; 1978. № 3. С. 46; 1980. № 4. С. 10; 1984. № 10. С. 33; 1985. № 1. С. 85.
2. Федоров Ф. И. // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 495; Докл. АН СССР. 1967. Т. 174. С. 334.
3. Cook A. H. // Proc. R. Soc. Lond. 1982. V. A384. P. 247.
4. Brill D., Wheeler J. // Rev. Mod. Phys. 1957. V. 29. P. 465.
5. Шишкин Г. В. // Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1: Физ. Мат. Мех. 1976. № 2. С. 22.
6. Черников Н. А., Шавохина Н. С. // ТМФ. 1973. Т. 16. С. 77.
7. Otchik V. S. // Class. Quant. Gravity, 1985. № 2. P. 539.
8. Riordar F. // Nuovo Cimento. 1974. V. B20. № 2. P. 309.
9. Шишкин Г. В., Андрушкевич И. Е. // Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1: Физ. Мат. Мех. 1985. № 3. С. 26; 1976. № 1. С. 6; 1976. № 2. С. 5; 1976. № 3. С. 3.

Поступила в редакцию 15.06.85.

УДК 621.315.592

Л. А. КАЗАКЕВИЧ, П. Ф. ЛУГАКОВ

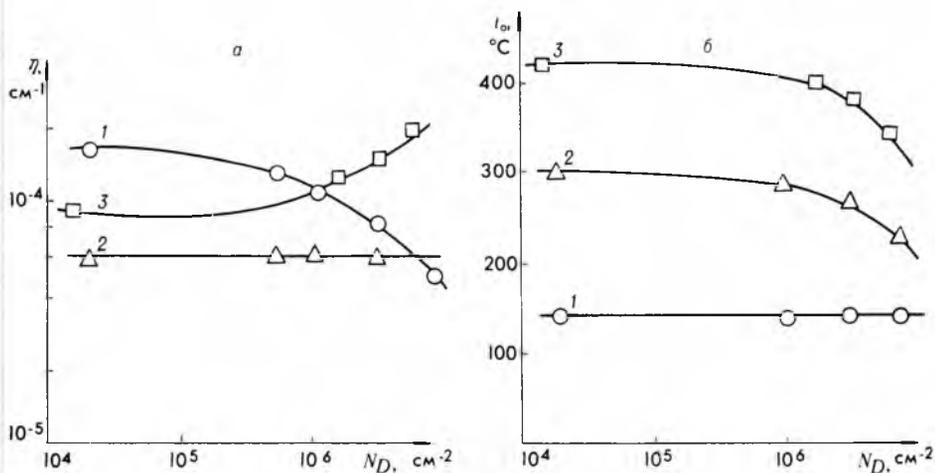
ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ДИСЛОКАЦИОННОМ КРЕМНИИ

Дислокации в кремнии создают сильное искажение кристаллической решетки и поля упругих напряжений, что приводит к изменению эффективности введения и температурной устойчивости радиационных дефектов (РД) [1—3]. При этом обнаруживается связь между природой РД и влиянием дислокаций на их параметры (эффективность образования, температура отжига), с целью установления которой выполнялась данная работа.

Исследования проводились на монокристаллах *n*- и *p*-кремния ($\rho = 20\text{—}1500 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), выращенных по методу Чохральского, и бестигельной зонной плавкой в вакууме, концентрация остаточных примесей (кислород, углерод) в которых, согласно ИК измерениям, составляла соответственно величину $\leq 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\leq 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Повышенная плотность дислокаций (N_D) создавалась при пластической деформации. Образцы подвергались четырехпорному изгибу вокруг направления $\langle 112 \rangle$ при температуре 750°C в течение 0,5—3 мин с последующим быстрым охлаждением (начальная скорость охлаждения $\geq 500^\circ\text{C}/\text{с}$). Исходные (бездислокационные) и пластически деформированные кристаллы облучались гамма-квантами ^{60}Co при $t \leq 50^\circ\text{C}$ на установке МРХ- γ -25М при плотности потока $J = 1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Изохронный 15-минутный отжиг проводился в интервале температур $80\text{—}600^\circ\text{C}$. Измерялись температурные ($80\text{—}400 \text{ K}$) зависимости коэффициента Холла на различных этапах облучения и отжига.

На рисунке показана зависимость от N_D эффективности образования

$\eta = \frac{dN}{d\Phi}$ (N — концентрация дефектов, Φ — интегральный поток гамма-квантов) и температуры отжига t_0 некоторых РД. Заключение об их природе сделано с учетом ранее выполненных исследований по энергетическому спектру уровней дефектов, кинетики их накопления и отжига [2, 3]. Эффективность образования дефектов рассчитывалась на линейном участке накопления РД, а за температуру отжига принималась температура, соответствующая уменьшению концентрации дефектов в e раз. Как видно, характер зависимостей η и t_0 от N_D определяется природой РД. Для одних дефектов с ростом N_D наблюдается уменьшение η и t_0 , для других — уменьшение только η , для третьих — увеличение η , но уменьшение t_0 .



Зависимость эффективности образования (а) и температуры отжига (б) E -центров (1), дивакансий (2) и комплексов углерод — кислород — дивакансия (3) от плотности дислокаций

При объяснении полученных результатов необходимо учесть, что в дислокационном кремнии накопление РД происходит как в матрице кристалла, так и вблизи дислокаций. Последние создают упругие (деформационные) поля, под воздействием которых к дислокациям мигрируют генерируемые облучением компоненты пар Френкеля (вакансии V и междоузлия I) [4], где они исчезают на краю лишней полуплоскости, аннигилируют между собой или участвуют в комплексообразовании. Из-за наличия этих процессов происходит уменьшение концентрации свободных V и I в матрице кристалла, а тем самым уменьшение и концентрации РД, в состав которых входят вакансии или междоузлия. На опыте действительно наблюдается уменьшение с ростом N_D эффективности введения E -центров (PV) и междоузельного углерода (C_I). Однако температурная устойчивость их не зависит от N_D , так как они образуются вдали от дислокаций.

Иная ситуация имеет место при комплексообразовании вблизи дислокаций. Мигрирующие к ним V и I могут взаимодействовать друг с другом или с атомами химических примесей, которые осаждаются при пластической деформации на дислокациях и образуют примесную атмосферу. Основу такой атмосферы составляют атомы кислорода [5], поэтому вблизи дислокаций при облучении накапливаются A -центры (OV). Эффективность введения их уменьшается с ростом N_D . Это связано с тем, что через A -центры происходит образование более сложных кислородсодержащих комплексов кислород — дивакансия (OV_2) и углерод —

кислород — дивакансия (COV_2) [6, 7]. При взаимодействии вакансий между собой у дислокаций формируются дивакансии (V_2). Характерным для всех этих РД (OV_2 , COV_2 , V_2) является то, что эффективность введения их может увеличиваться с ростом N_D (COV_2) или оставаться практически постоянной при всех значениях N_D (OV_2 , V_2). Объясняется это тем, что вблизи дислокаций велика локальная концентрация участвующих в комплексобразовании компонент (вакансии, кислород, комплексы CO). Температура отжига комплексов OV , OV_2 , V_2 , COV_2 уменьшается при увеличении N_D из-за изменения энергии связи или энергии миграции дефектов при деформации и искажении кристаллической решетки вблизи дислокаций [8].

При повышенных температурах отжига подвижные комплексы могут мигрировать к дислокациям и участвовать там в процессах перестройки РД. Такими комплексами являются E -центры и междоузельный углерод, которые как целое [9] диффундируют на стоки (в данном случае дислокации). С их участием при отжиге формируются фосфорсодержащие (фосфор — три вакансии PV_3 или фосфор — две вакансии PV_2) [3, 10] и углеродсодержащие (междоузельный углерод — междоузельный кислород $C_I O_I$ или междоузельный углерод — узловой углерод $C_I C_S$) [3, 11] дефекты. Эффективность их накопления, как и эффективность образования E -центров и междоузельного углерода в матрице кристалла, уменьшается с ростом N_D . Однако отжигаются они в дислокационных кристаллах при более низких температурах, так как находятся вблизи дислокаций в искаженной области кристаллической решетки.

Проведенный анализ процессов радиационного дефектообразования в дислокационном кремнии и обобщение полученных результатов позволяют дать классификацию РД и разделить их на группы с учетом связи между природой дефектов и влиянием дислокаций на их параметры.

Первая группа — это дефекты, состоящие из одного или нескольких первичных РД и атомов примеси, не осаждающейся при пластической деформации на дислокациях. Для этих дефектов характерно уменьшение η и неизменность t_0 при увеличении N_D .

Вторая — дефекты, в состав которых входит один первичный РД и атомы примесей, осаждающиеся на дислокациях; η и t_0 таких дефектов уменьшаются с ростом N_D .

Третья — чисто структурные дефекты и дефекты, состоящие из нескольких первичных РД и атомов примесей, которые осаждаются на дислокациях. В этом случае η не уменьшается, а t_0 уменьшается с ростом N_D .

Параметры радиационных дефектов в кремнии

Группа	Дефект	Бездислокационный Si		Дислокационный Si	
		η , cm^{-1}	t_0 , °C	η , cm^{-1}	t_0 , °C
I	PV	$1,6 \cdot 10^{-4}$	140	$8,0 \cdot 10^{-5}$	140
I	C_I	$2,5 \cdot 10^{-5}$	115	$3,0 \cdot 10^{-6}$	115
II	OV	$4,5 \cdot 10^{-4}$	360	$2,0 \cdot 10^{-4}$	230
III	V_2	$6,0 \cdot 10^{-5}$	300	$6,0 \cdot 10^{-5}$	270
III	OV_2	$8,0 \cdot 10^{-5}$	440	$8,0 \cdot 10^{-5}$	380
III	COV_2	$9,0 \cdot 10^{-5}$	420	$1,5 \cdot 10^{-4}$	370
IV	$C_I O_I$ ($C_I C_S$)	$4,0 \cdot 10^{-4}$	320	$1,0 \cdot 10^{-4}$	280
IV	PV_3 (PV_2)	$8,0 \cdot 10^{-5}$	480	$4,0 \cdot 10^{-5}$	440

Четвертая — дефекты, образующиеся в результате перестроек с участием одних только подвижных комплексов РД или комплексов РД и атомов примесей, осаждающихся на дислокациях. В дислокационных

кристаллах η таких дефектов изменяется так же, как и скорость образования комплексов РД в матрице кристалла, а T_0 уменьшается.

В таблице дано распределение по группам исследованных электрически активных РД и приведены значения их параметров в исходных и дислокационных ($N_D = (2-5) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$) кристаллах. Следует отметить, что в кремнии возможно образование дефектов в результате перестроек при отжиге с участием комплексов РД и атомов примесей, которые не осаждаются на дислокациях. Для этих дефектов η должна изменяться так же, как и эффективность образования комплексов РД, а T_0 не зависеть от N_D . Такие дефекты можно объединить в отдельную пятую группу.

Результаты выполненных исследований показывают, что процессы накопления и отжига РД в дислокационном кремнии зависят от их природы и механизмов образования. Установленная закономерность влияния дислокаций на параметры РД может оказаться полезной при идентификации дефектов неизвестной природы.

Список литературы

1. Коноплева Р. Ф., Новиков С. Р. // ФТП. 1968. Т. 2. № 9. С. 1290.
2. Kazakevich L. A., Lugačov P. F. // Phys. stat. sol. (a). 1982. V. 71. № 1. P. 99.
3. Kazakevich L. A., Lugačov P. F. // Ibid. V. 74. № 1. P. 113.
4. Любов Б. Я., Власов Н. М. // ФММ. 1979. Т. 47. № 1. С. 140.
5. Еременко В. Г., Никитенко В. И., Якимов Е. Б. // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. № 3. С. 1129.
6. Козлов И. П., Литвинко А. Г., Лугаков П. Ф., Мишук С. В., Ткачев В. Д. // ФТП. 1972. Т. 6. № 10. С. 2048.
7. Lee Y. H., Corbett J. M., Brower K. L. // Phys. stat. sol. (a). 1974. V. 41. № 2. P. 637.
8. Дамаск Н., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. М., 1966.
9. Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981.
10. Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. // ФТП. 1983. Т. 17. № 1. С. 166.
11. Литвинко А. Г., Макаренко Л. Ф., Мурын Л. И., Ткачев В. Д. // ФТП. 1980. Т. 14. № 4. С. 776.

Поступила в редакцию 21.09.85.

УДК 621.315.592

АХМЕД ШАХ БАХТЕРИ, М. И. ТАРАСИК,
Д. С. ШВАРКОВ, А. М. ЯНЧЕНКО

ПРИМЕНЕНИЕ ОДНООСНЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Для определения симметрии дефектов структуры кристаллической решетки используются методы, связанные с приложением одноосных нагрузок к кристаллу полупроводника. Электронные энергетические уровни дефектов при этом могут испытывать смещение или расщепление в зависимости от того, существует или отсутствует орбитальное вырождение [1]. Кроме того, вследствие понижения локальной симметрии дефектов за счет одноосной нагрузки может быть снято ориентационное вырождение [2]. Особенно наглядно эффекты расщепления и смещения уровней проявляются в оптических экспериментах (излучательная рекомбинация, поглощение электромагнитного излучения) [3, 4]. Однако существует большая группа дефектов, которая влияет на электрические свойства полупроводников, но не проявляется в оптических экспериментах. Для получения сведений о природе электрически активных дефектов могут быть использованы измерения пьезоколлэффекта [5]. Данная работа посвящена рассмотрению возможностей этого метода.

Известно, что для невырожденного полупроводника n -типа концентрация электронов в зоне проводимости определяется выражением

$$n_0 = N_{c0} \exp(E_{F0}/kT), \quad (1)$$