

мамотки, удаленной от средней плоскости. Обмотки можно объединять в группы и пропускать по отдельным секциям независимые токи, создавая поля требуемой конфигурации. Измерение составляющей B_z магнитного поля производилось датчиком Холла, размещенным на координатном устройстве.

На этой магнитной системе были проведены результаты расчета токов для пятисекционных катушек, создающих поле $B_z = B_0 r_0 / r$ в кольцевой области, ограниченной радиусами $r_1 = 30$ и $r_2 = 70$ мм. На рис. 3, а, б приведены теоретическая (1) и экспериментальная (2) зависимости $f(r) = rB_z(r, z=0)$. Для исследуемого конусовидного поля $B_z = B_0 r_0 / r$ величина rB_z в рабочей области сохраняет постоянное значение с точностью $\pm 0.5\%$ (рис. 3, б). Отдельные точки соответствуют измеренным значениям, сплошная кривая — расчетным. Для нескольких точек показана величина ошибки измерения. Погрешность определения координаты составляла 0.1 мм, величины магнитного поля — 0.2 Гс. Значения токов в катушках соответствовали расчетным с точностью 0.05%. Видно, что в пределах погрешности измерения экспериментальные результаты совпадают с расчетными.

Заключение

В работе показано, что для создания неоднородного магнитного поля, обладающего высокой дисперсией по массе, можно применить магнитную систему, состоящую из двух соосных секционированных соленоидов, симметричных относительно плоскости движения ионов.

Описан метод расчета распределения токов в системе секционированных соленоидов для формирования заданного поля и проведен расчет для конкретного вида поля.

Показано, что результаты расчета поля хорошо совпадают с экспериментальными данными, что подтверждает как корректность расчетов по описанному методу, так и практическую возможность изготовления подобных систем с достаточной точностью.

Литература

- [1] *Faccetti S. M.* Mass Spectrometry of Large Molecules. Amsterdam, Elsevier, 1985.
- [2] *Зенкевич В. Б., Сычев В. В.* Магнитные системы на сверхпроводниках. М., 1972.
- [3] *Hariman H., Wanczek K. P.* Ion Cyclotron Resonance Spectrometry II. Berlin, Springer--Verlag, 1982.
- [4] *Смайт В.* Электростатика и электродинамика. М., 1954.
- [5] *Луганский Л. Б.* ЖТФ, 1985, т. 55, № 7, с. 1263—1271.
- [6] *Лоусон, Хенсон Р.* Численное решение задач метода наименьших квадратов. М., 1986.
- [7] Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. М., 1979.
- [8] *Глебов И. А., Лаверик Ч., Шахтарин В. Н.* Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Л., 1980.
- [9] *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М., 1980.

Научно-техническое объединение
Институт аналитического приборостроения
АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
15 мая 1987 г.

ОБРАЗОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИЕВЫХ $p-n$ ДИОДАХ С ПРИМЕСЬЮ ЛИТИЯ

Л. С. Берман, В. Б. Воронков, И. В. Грехов,
И. М. Котина, К. Ш. Кушавили

В настоящее время введение лития используется для повышения радиационной стойкости кремниевых солнечных элементов [1], однако механизм взаимодействия лития с радиационными дефектами (РД) мало изучен. Цель настоящей работы — исследование этого механизма, а также его особенностей для других кремниевых приборов. Сравнивались образование РД, их отжиг, а также коэффициенты повреждения K в кремниевых $p-n$ диодах с примесью Li и без Li (контрольных), облученных γ -квантами Co^{60} .

Образцы были изготовлены из бестигельного n -кремния диффузией бора в воздухе (в открытой кварцевой трубе), на области создавался слой n^+ диффузией фосфора. Омические контакты — сплошные на обл. p , полосы на обл. n создавались вжиганием Ni. Введение Li осуществлялось со стороны базы (после создания омических контактов) путем вакуумного напыления и последующей диффузии при 400 °С, 5 ч.

Методика измерений

Суммарная концентрация мелкой примеси или ее профиль

$$N_M(h) = N_P + N_{Li} + N_{LiO}$$

определялись по вольт-фарадным характеристикам (ВФХ) [2, 3], где N_P , N_{Li} , N_{LiO} — концентрации фосфора, лития и комплекса литий-кислород; h — толщина области объемного заряда (003).

Параметры РД определялись методом DLTS [4] в интервале 65—300 К. Использовалась автоматизированная установка для емкостной спектроскопии [5]. Время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) τ_p измерялось методом Лэкса [6].

Результаты измерений и их обсуждение

Образцы группы 1. Исходное удельное сопротивление $\rho_{всх} \approx 300 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $T_{диф} = 1100 \text{ °С}$, $t = 4.5 \text{ ч}$. Глубина залегания $p^+ - n$ перехода $x_j \approx 5 \text{ мкм}$, $\tau_{p,n} = 40 \text{ нс}$ (где $\tau_{p,n}$, $\tau_{p,n.о}$, $\tau_{p,ох}$ — значения τ_p до введения Li, после введения Li, после облучения). Типичная зависимость $N_M(h)$ после введения Li (до облучения) приведена на рис. 1. Заметим, что $N_{Li} + N_{LiO} \gg N_P$. Уменьшение N_M вблизи области p^+ обусловлено тем, что область p^+ является стоком для Li [7]. Зависимости $N_M(h)$ и $(S/C)^3 = f(V)$ близки к прямым (где V — обратное напряжение); этот результат согласуется с расчетами работы [8]. После введения Li $\tau_{p,n.о} = 1 \div 5 \text{ нс}$. В этих и других исследованных нами образцах введение Li приводит в одних случаях к уменьшению τ_p , а в других — к увеличению (см. таблицу). В работе [1] показана возможность повышения времени жизни ННЗ в необлученном кремнии путем нейтрализации рекомбинационных центров (РЦ) литием. Наши результаты показывают, что введение Li может быть причиной как нейтрализации существующих РЦ, так и образования новых РЦ. Природа этих РЦ, механизм их образования и нейтрализации — задача дальнейших исследований.

До облучения концентрация остаточных глубоких центров (ГЦ) в образцах гр. 1 $N_G < 10^{12} \text{ см}^{-3}$. После облучения образовались А-центры (комплекс вакансия-кислород) — см. таблицу.

В образцах с Li и в контрольных (без Li) скорости введения А-центров v_A одного порядка, а коэффициент повреждения в образцах с Li на порядок больше, чем в контрольных. Известно, что в кремниевых $p^+ - n$ диодах, изготовленных диффузией в воздухе и облученных γ -квантами, А-центр является основным рекомбинационным центром (РЦ) [9]. Следовательно, при облучении γ -квантами $p^+ - n$ диодов с Li в n -базе образуются дополнительные РД, являющиеся эффективными РЦ.

Был проведен изохронный отжиг (шаг 20°, $t = 2 \text{ ч}$) — рис. 2. При 100 °С полностью отжигаются А-центры и восстанавливается время жизни дырок. Этот результат согласуется с работами [10, 11], где наблюдался отжиг РД в кремниевых $p^+ - n$ диодах с Li при $T \leq 100 \text{ °С}$. Заметим для сравнения, что в аналогичных диодах без Li отжиг А-центров и восстановление τ_p происходят при $T \approx 350 \text{ °С}$ [9].

Образцы группы 2. $\rho_{всх} \approx 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $T_{диф} = 1270 \text{ °С}$, $t = 17 \text{ ч}$, $x_j \approx 100 \text{ мкм}$, $\tau_{p,n} = 35 \text{ нс}$. После введения Li градиент концентрации $N_M a = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$, $\tau_{p,n.о} = 20 \div 25 \text{ нс}$. До облучения $N_G < 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Результаты измерения облученных образцов приведены в таблице. В образцах с Li и в контрольных скорости введения А-центров приблизительно оди-

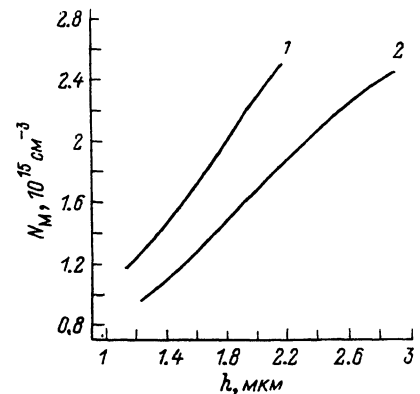


Рис. 1. Зависимость $N_M(x)$ в $p^+ - n$ переходах с Li.

1 — образец группы 1а, 2 — образец группы 2а.

Образец	Группа	$\tau_{pн}$, мкс	$\tau_{pн.о}$, мкс	Φ , 10^{17} кВ/см ²	v_A , 10^{-1} кВ ⁻¹ · см ⁻¹	K , 10^{-17} мкс ⁻¹ · кВ ⁻¹ · см ²
1	а	40	1	1.8	2.5	2.8
	б	50	—	1.8	1.9	0.3
1*	в	15	3	0.16	0.9	4.4
	г	5	3.5	0.16	0.9	4.4
2	а	35	25	0.5	4.4	0.5
	б	40	—	0.5	4	0.2
2*	в	9	8	0.5	1.9	2.3
	г	6	8	0.5	1.6	2.3

Примечание. гр. 1: а — $\rho = 300$ Ом · см, $x_j = 5$ мкм с Li; б — контрольные без Li; гр. 1*: в — $\rho = 300$ Ом · см, $x_j = 7$ мкм с Li с предварительным введением O₂; г — с Li без предварительного введения O₂; гр. 2: а — $\rho = 30$ Ом · см, $x_j = 100$ мкм с Li; б — контрольные без Li; гр. 2*: в — $\rho = 30$ Ом · см, $x_j = 7$ мкм с Li с предварительным введением O₂; г — с Li без предварительного введения O₂.

наковы, а коэффициент повреждения в образцах с Li в два раза больше, чем в контрольных. Следовательно, в образцах гр. 2 с Li, как и в образцах гр. 1, при облучении образуются дополнительные РД. Однако эти РД не наблюдались по спектрам DLTS, что может быть обусловлено двумя причинами: 1) энергия ионизации РД $\Delta E < 0.15 \div 0.20$ эВ, и их перезарядка не наблюдается в интервале 65—300 К; 2) концентрация РД меньше пороговой чувствительности измерительной установки для данных образцов (10^{12} см⁻³). В этом случае из сравнения значений N_A и K для образцов с Li и без Li следует, что для этих РД $\sigma_p > 10^{-15}$ см² (где σ_p — сечение захвата дырки).

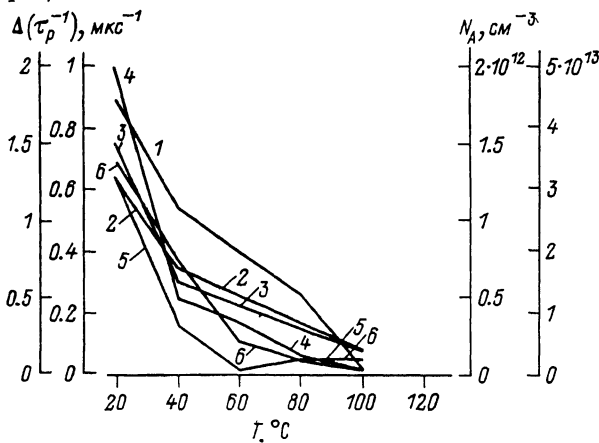


Рис. 2. Зависимости концентрации А-центров и времени жизни дырок от температуры отжига. N_A : 1 — гр. 1а (масштаб справа по оси), 2 — гр. 1* в, 3 — гр. 1* г (масштаб слева по оси). $\Delta(\tau_p^{-1})$: 4 — гр. 1а (масштаб слева по оси), 5 — гр. 1* в, 6 — гр. 1* г (масштаб справа по оси).

Заметим для сравнения, что, по данным работы [10], при высокой интенсивности облучения коэффициенты повреждения p — n диодов с Li и без Li приблизительно одинаковы, т. е. введение Li не обязательно приводит к увеличению коэффициента повреждения.

Был произведен изохронный отжиг (шаг 20°, $t = 2$ ч) — рис. 3. При 120 °С концентрация А-центров N_A уменьшается в 2 раза, а $\Delta(\tau_p^{-1})$ — в 5 раз (где $\Delta(\tau_p^{-1}) = \tau_{pобл}^{-1} - \tau_{pн.о}^{-1}$), т. е. τ_p восстановилось почти полностью. При дальнейшем отжиге N_A и $\Delta(\tau_p^{-1})$ несколько возрастают (т. е. имеет место отрицательный отжиг; его механизм требует дополнительного исследования). При 360 °С происходит полный отжиг А-центров, а при 400 °С снова почти полное восстановление τ_p .

Первоначально предполагалось, что разница в отжиге РД в образцах гр. 1 и 2 обусловлена тем, что в образцах гр. 2 больше концентрация кислорода N_O , проникшего в ходе диффузии В, а следовательно, больше концентрация комплекса LiO и меньше концентрации Li, «залечивающего» РД. Для проверки этого предположения были изготовлены p — n диоды из того же исходного кремния, что и образцы гр. 1 и 2 (образцы гр. 1* и 2*); $T_{диф} = 1100$ °С,

$t=5$ ч, $x_j \approx 7$ мкм, с Li. В часть пластин образцы 1* и 2* перед созданием $p^+ - n$ перехода был введен кислород $T_{\text{диф}}=1270$ °С, $t=17$ ч (образцы 1*в, 2*в). После облучения был произведен изохронный отжиг (рис. 2, 3). Во всех образцах (как с предварительным введением кислорода,

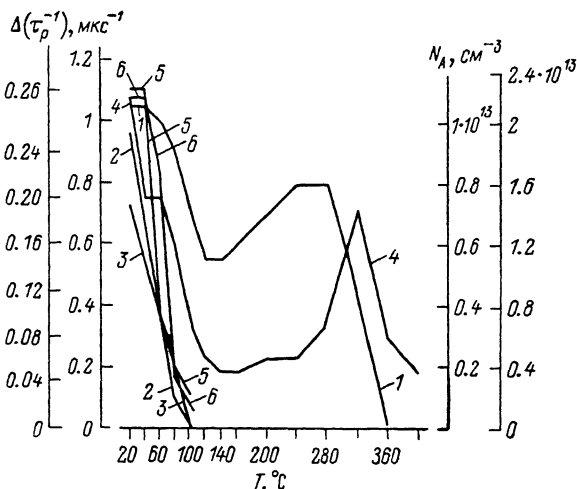


Рис. 3. Зависимости концентрации А-центров и времени жизни дырок от температуры отжига. N_A : 1 — гр. 2а (масштаб справа по оси), 2 — гр. 2*в, 3 — гр. 2*г (масштаб слева по оси). $\Delta(\tau_p^{-1})$: 4 — гр. 2а (масштаб слева по оси), 5 — гр. 2*в, 6 — гр. 2*г (масштаб справа по оси).

так и без него) при 100 °С происходит полный отжиг А-центров и восстановление τ_p . Следовательно, замедление отжига РД в образцах гр. 2 не может быть объяснено высокой концентрацией кислорода. По-видимому, причина в том, что бор, глубоко проникший в n -базу, связывает литий и тем самым уменьшает его подвижность на расстоянии порядка L_p от области p .

Выводы

1. В $p-n$ диодах с литием коэффициент повреждения может быть больше, чем в аналогичных диодах без лития.
2. В $p-n$ диодах с мелким переходом ($x_j=5 \div 15$ мкм) введение лития позволяет уменьшить температуру отжига А-центров и восстановления времени жизни дырок до 100 °С по сравнению с 350 °С для аналогичных диодов без лития.
3. В $p-n$ диодах с глубоким переходом ($x_j \approx 100$ мкм) введение лития позволяет почти полностью восстановить время жизни дырок при температуре отжига 140 °С.

Литература

- [1] Крейнин Л. Б., Григорьева Г. М. Итоги науки и техники. Сер. «Исследование космического пространства». М., 1979, т. 13, с. 127.
- [2] Берман Л. С. Введение в физику варикапов. Л.: Наука, 1968.
- [3] Faith T. J., Brucker G. J., Holmes-Siedle A. G., Needle R. S. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1968, v. NS-15, N 6, p. 61—68.
- [4] Lang D. V. J. Appl. Phys., 1974, v. 45, N 7, p. 3023—3032.
- [5] Берман Л. С., Ременюк А. Д., Толстобров М. Г. Препринт 974, ФТИ АН СССР. Л., 1985. 24 с.
- [6] Lax B., Neustadter S. F. J. Appl. Phys., 1954, v. 25, N 9, p. 1148—1154.
- [7] Pell E. M. J. Appl. Phys., 1960, v. 31, N 9, p. 1675—1679.
- [8] De Man H. J. J. IEEE Trans. Electron Devices, 1970, v. 17, N 12, p. 1087—1088.
- [9] Берман Л. С., Витман Р. Ф., Шуман В. Б. ФТП, 1975, т. 9, № 2, с. 311—315.
- [10] Wysocki J. J. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1966, v. NS-13, N 6, p. 168—173.
- [11] Roux M., Roulet R., Bernard J. et al. Rad. Eff., 1984, v. 81, N 3/4, p. 263—275.

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

Поступило в Редакцию
19 мая 1987 г.