

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕМ МЕТОДОМ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Акулович Н. И., Быковский В. А., Петренко В. В.,
Карпович Л. М., Утенко В. И.

Исследованы электрофизические свойства и фотолюминесценция высокоомных монокристаллов кремния *n*- и *p*-типа, легированных алюминием при облучении их высокоэнергетичными γ -квантами.

Эффект легирования наблюдается непосредственно после облучения, и уровень легирования растет с увеличением флюенса γ -квантов. Подвижность носителей заряда (дырок) устанавливается на уровне $300\text{--}350\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ после отжига при $300\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$. Для достижения заданного уровня легирования кристаллов при полном восстановлении их рекомбинационных параметров необходим отжиг при $700\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$.

Метод фотоядерного легирования (ФЯЛ) кремния, основанный на протекании ядерных реакций типа $^{28}\text{Si}(\gamma, p)^{27}\text{Al}$ и $^{28}\text{Si}(\gamma, n) \rightarrow ^{27}\text{Si} \xrightarrow[4.1\text{с}]{\beta^+} ^{27}\text{Al}$ под воздействием высокоэнергетического γ -облучения, позволяет получать монокристаллы Si <Al> с высокой однородностью распределения атомов алюминия, недостижимой в традиционной технологии металлургического легирования.

Перспективность использования высокосовершенных легированных кристаллов Si <Al> при изготовлении ИК фотоприемников с рабочей областью $8\text{--}14\text{ мкм}$ и ряда других кремниевых приборов и устройств стимулирует изучение проблем фотоядерного легирования кремния [1-3].

В настоящей работе исследовались фотоядерно легированные монокристаллы кремния, полученные облучением тормозными γ -квантами ($E_{\text{max}} \sim 33\text{ МэВ}$) при четырех значениях флюенсов, соответствующих введению алюминия в концентрации $N_{\text{Al}} = 1.5, 3, 9, 15 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$. Облучение и расчет N_{Al} проводились по методике, предложенной в [4]. В качестве исходного материала использовались монокристаллы зонных *n*-Si ($\rho_{\text{вск}} = 700\text{--}1200\text{ Ом}\cdot\text{см}$) и *p*-Si ($\rho_{\text{вск}} = 5700\text{--}8800\text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Исследовались электрофизические параметры и фотолюминесценция (ФЛ) кристаллов после облучения и в процессе изохронного 15-минутного отжига в интервале температур $T_{\text{отж}} = 100\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$.

Спектры ФЛ при $T = 4.2\text{ К}$ исходных кристаллов содержали линии излучения, обусловленные рекомбинацией свободных экситонов и экситонов, связанных на остаточных технологических примесях Р и В (рис. 1, а). В спектрах ФЛ образцов до температур отжига $T_{\text{отж}} < 500\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдались линии *W*, *J*, *E*, *C*, характерные для кристаллов Si, облученных нейтронами, γ -квантами (рис. 1, б). Эти линии излучения обусловлены рекомбинацией на радиационных дефектах с участием остаточных примесей С, О и других [5]. Дальнейший отжиг приводит к исчезновению этих линий, а в близкрасовой области спектра начинают проявляться экситонное излучение, интенсивность которого достигает стационарных значений при $T_{\text{отж}} = 700\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$. Анализ спектров ФЛ с высоким разрешением ($\sim 0.25\text{ мэВ}$) позволил идентифицировать бесфононные линии экситонов, связанных на акцепторах алюминия Al_{N_p} (*BE*), и их фононные повто-

ния $Al_{T0}(BE)$ (рис. 1, в). Характерно, что интенсивность этих линий растет с флюенсом высокоэнергетических γ -квантов, а отношение интенсивностей $T0$ -фононных повторений связанного и свободного экситонов $I_{T0}(BE)/I_{T0}(FE)$ увеличивается пропорционально концентрации атомов Al, введенных в результате фотоядерных реакций [6]. В процессе отжига радиационных дефектов в спектрах ФЛ проявлялись также характерные для исходных материалов линии экситонов, связанных на остаточных примесях P и B.

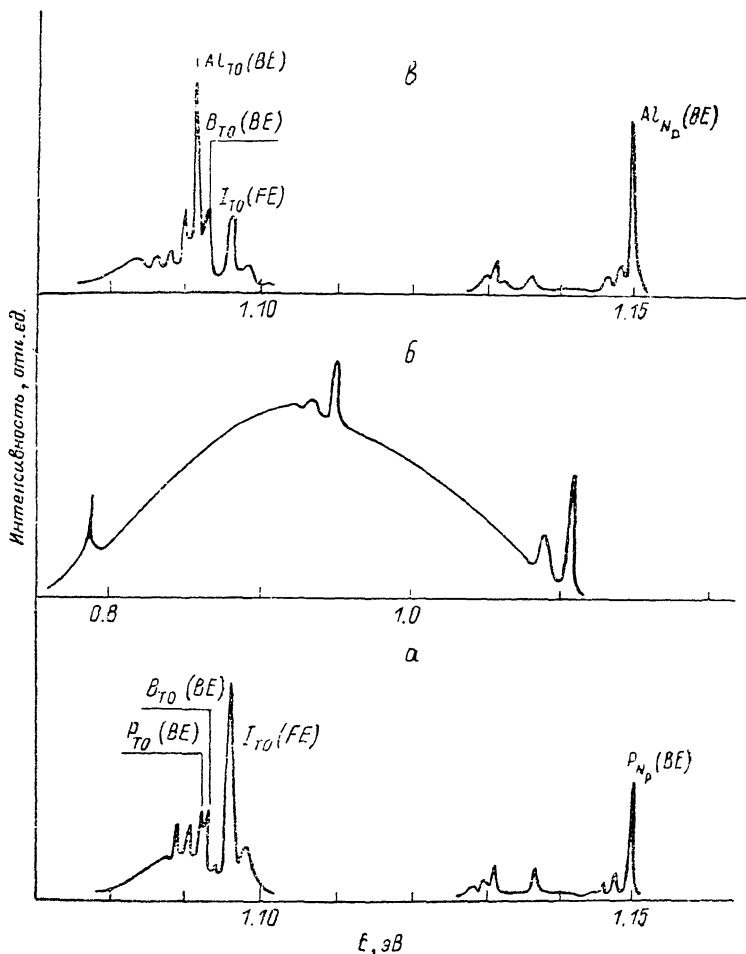


Рис. 1. Спектр ФЛ при $T=4.2$ К образцов ФЯЛ кремния.

а — исходный n -Si; б, в — фотоядерно легированный Si ($N_{Al} \approx 9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$). $T_{отж}$, °C: б — 350, в — 750.

Из измерений эффекта Холла при $T=300$ К определялись концентрация (n, p) и подвижность μ_n, μ_p носителей заряда в образцах ФЯЛ кремния. На рис. 2 представлены зависимости этих параметров от температуры отжига ФЛ кристаллов, полученных на основе зонного n -Si. Следует отметить, что оба типа исходных кристаллов после облучения обладают дырочной проводимостью и характерной для легированных кристаллов p -типа подвижностью, причем как концентрация, так и подвижность проявляют тенденцию к увеличению с ростом флюенса γ -квантов. Этот результат противоречит имеющимся представлениям о поведении монокристаллов кремния при воздействии на них ионизирующим излучением, согласно которым облучение должно приводить к компенсации материала (уменьшению n, p , а также μ_n, μ_p), увеличивающейся с ростом флюенса облучения.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Непосредственно в процессе облучения образовавшиеся при трансмутациях атомы Al в большинстве своем локализуются в электрически активном положении заме-

щения, проявляя акцепторные свойства. Концентрация радиационных дефектов (например, наблюдаемых в спектрах ФЛ) при заданных флюенсах облучения оказалась невелика и в основном пошла на компенсацию мелких остаточных примесей и С, О. В результате сразу после облучения (без проведения отжига) наблюдается эффект легирования кристаллов. При дальнейшем отжиге наблюдается изменение концентрации и подвижности дырок. Стабилизация концентрации дырок на уровнях, соответствующих задаваемому легированию, происходила после отжига при $T_{отж} \sim 700^\circ\text{C}$, а подвижность достигала значений $\mu_p = 300-350 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при более низких температурах отжига $T_{отж} = 300-400^\circ\text{C}$. Вероятно, изменения концентрации носителей заряда при отжиге в диапазоне $T_{отж} = 300-700^\circ\text{C}$ связаны с перестройкой и распадом центров, не оказывающих существенного влияния на рассеяние носителей заряда.

На основании проведенного исследования можно заключить следующее. Облучение исследованных (высокоомных) кристаллов Si высокоэнергетичными γ -квантами с целью фотоядерного легиро-

вания (до значений $N_{Al} \leq 1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) не приводит к характерной для радиационных воздействий компенсации кристаллов. После облучения кристаллы проявляют дырочную проводимость, причем при увеличении флюенса γ -квантов имеет место увеличение концентрации дырок.

Очевидно, значительная часть атомов акцепторной примеси Al, введенных в кремний методом ФЯЛ, занимает электрически активные положения замещения непосредственно в процессе облучения.

Для достижения заданного уровня легирования материала при полном восстановлении его рекомбинационных параметров необходим отжиг при $T \approx 700-800^\circ\text{C}$.

Список литературы

- [1] Легирование полупроводников методом ядерных реакций / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1981. 182 с.
- [2] Арифов У. А., Сияюков В. А., Масагутов В. С., Михяэлян В. М., Коростелев Ю. А., Литович А. С. // Кристаллизация тонких пленок. Ташкент, 1970. С. 133-135.
- [3] Findlay D. J. S., Totterdell D. H. J. // Semicond. Sci. Technol. 1988. V. 3. P. 388-396.
- [4] Заблочный В. В., Леонов Н. Н., Иванов Н. А., Петренко В. В. // Тез. докл. VI Всес. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. М., 1988. 309 с.
- [5] Sauer R. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1985. V. 46. P. 507-518.
- [6] Tajima M. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. N 41. P. 719-721.

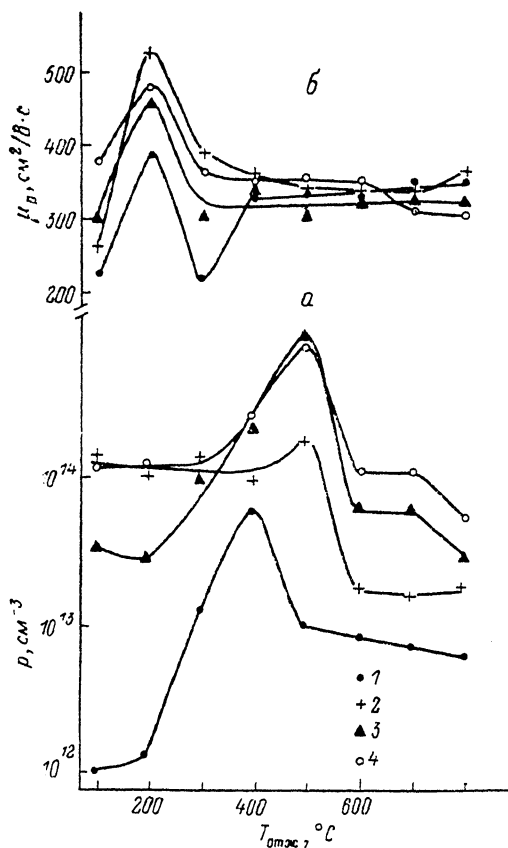


Рис. 2. Зависимость концентрации (а) и подвижности (б) дырок от температуры отжига в ФЛ кремния (исходный материал n -Si, $\rho = 700-1200 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Расчетная концентрация трансмутированного алюминия N_{Al} , см^{-3} : 1 — $1.5 \cdot 10^{12}$, 2 — 3×10^{13} , 3 — $9 \cdot 10^{13}$, 4 — $1.5 \cdot 10^{14}$.