

ОПТИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ЯДЕР Si^{29} В КОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Н.Т.Баграев, Л.С.Власенко, Р.А.Житников

Путем оптической накачки получена динамическая поляризация ядер Si^{29} в кремнии *n*-типа, компенсированном золотом. Измерены времена ядерной спин-решеточной релаксации при световом облучении. Проведено сравнение эффективности оптической поляризации ядер Si^{29} в компенсированном кремнии и кремнии, содержащем только донорную примесь.

Динамическая поляризация ядер Si^{29} в кремнии, обусловленная фотовозбужденными электронами, впервые была получена в работе [1]. В

качестве объекта исследования использовался кремний n -типа с концентрацией атомов фосфора $N(P) \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Ядра Si^{29} в таких образцах имеют большое время спин-решеточной релаксации в отсутствие светового облучения ($T_{\text{темн}} \sim 200$ часов). Это время уменьшалось примерно до 20 часов при освещении кремния. Так как время установления ядерной намагниченности $\langle I_z \rangle$ равно времени релаксации ядер Si^{29} при световом облучении, то значительную поляризацию ядер Si^{29} можно получить только при длительном освещении образца. Значения степени поляризации ядер Si^{29} , экстраполированные к бесконечному времени облучения, и времена ядерной спин-решеточной релаксации приведены в таблице. Образец 1 представлял собой кремний, легированный фосфором с $N(P) \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При оптической накачке его неполяризованным и циркулярно поляризованным светом концентрация фотовозбужденных электронов составляла $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Расчет степени поляризации ядер Si^{29} для этого образца проводился на основании данных работы [1].

В работе [1] было показано, что степень ядерной поляризации $\langle I_z \rangle$ при генерации светом электронов проводимости зависит от соотношения между временем спиновой релаксации электронов τ_s и временем жизни фотовозбужденных электронов τ . В случае накачки неполяризованным светом отношение ядерной поляризации к ее равновесному значению в отсутствие светового облучения I_0 определяется выражением [1]

$$\frac{\langle I_z \rangle}{I_0} = 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_n} \frac{\tau_s}{\tau + \tau_s} f. \quad (1)$$

Здесь γ_e , γ_n — гироманнитные отношения электрона и ядра Si^{29} , соответственно; $f = T_1/T_{1e}$ — фактор утечки ядерной поляризации [2], где T_1 — полное время спин-решеточной релаксации ядер Si^{29} ; T_{1e} — время спин-решеточной релаксации, обусловленное только взаимодействием с фотовозбужденными электронами.

При оптической накачке циркулярно поляризованным светом предельная степень ядерной поляризации $\langle I_z \rangle$ определяется выражением [1].

$$\langle I_z \rangle = \frac{1}{2} \frac{g_+ - g_-}{g_+ + g_-} \frac{\tau_s}{\tau + \tau_s} f, \quad (2)$$

где g_+ и g_- — скорости генерации электронов с проекцией спина $+\frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$, соответственно.

В кремнии, легированном фосфором, отношение времен $\tau_s/\tau \sim 10^{-3}$ мало, что, как видно из (1) и (2), приводит к уменьшению степени ядерной поляризации.

Для получения значительной степени поляризации ядер Si^{29} и сокращения времени, за которое она может быть достигнута, представляет интерес использование в качестве объекта оптической накачки компенсированного кремния, содержащего глубокие примеси, которые могут значительно уменьшить время жизни неравновесных носителей τ . Например, введение в кремний n -типа атомов золота позволяет снизить время жизни фотовозбужденных электронов примерно на два порядка [3].

В настоящей работе проводились эксперименты по оптической поляризации ядер Si^{29} в кремнии с концентрацией атомов фосфора $N(\text{P}) \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$, содержащем также атомы золота ($N(\text{Au}) > 10^{16} \text{ см}^{-3}$) (образец 2 в таблице). Были также проведены эксперименты с кремнием *n*-типа, содержащем только атомы фосфора примерно в той же концентрации, что и в образце 2 ($N(\text{P}) \approx 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) (образец 3 в таблице).

Облучение светом образцов 2 и 3 и измерение ядерной намагниченности осуществлялось по методике, аналогичной описанной в работе [1]. Источником света служила лампа накаливания мощностью 1 *квт*. Накачка производилась при 77К, циркулярно поляризованным светом – в магнитном поле $\sim 1 \text{ кгс}$ и неполяризованным светом – в магнитном поле $H_0 \approx 4,9 \text{ кгс}$. Концентрация фотовозбужденных электронов в образцах при освещении была $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Поляризация ядер Si^{29} и времена спин-решеточной релаксации измерялись радиоспектрометром ЯМР со скрещенными катушками методом быстрого адиабатического прохождения [2].

Результаты экспериментов по оптической поляризации ядер Si^{29} в образцах 2 и 3 также приведены в таблице.

Образец	Циркулярно поляризованный свет		Неполяризованный свет	
	ядерная поляризация, %	$T_1, \text{час}$	ядерная поляризация, %	$T_1, \text{час}$
1 $\text{Si} < \text{P} >$ $N(\text{P}) \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ по данным [1]	$0,74 \cdot 10^{-3}$	27	$2,4 \cdot 10^{-4}$	22
2 $\text{Si} < \text{P} + \text{Au} >$ $N(\text{P}) \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $N(\text{Au}) > 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1,3	$3,0 \cdot 10^{-4}$	3,0
3 $\text{Si} < \text{P} >$ $N(\text{P}) \approx 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	2,2	$7,7 \cdot 10^{-5}$	4,2

При оптической накачке компенсированного кремния (образец 2) циркулярно поляризованным светом была получена поляризация ядер Si^{29} равная $1,3 \cdot 10^{-3}\%$, что соответствует равновесной поляризации в магнитном поле $\approx 50 \text{ кгс}$ при $T = 77\text{К}$. Время ядерной релаксации T_1 в этом образце оказалось значительно меньшим, чем для образца 1. Для образцов 2 и 3 были измерены времена ядерной релаксации в отсутствие светового облучения $T_{1\text{темн}}$. Уменьшение времени релаксации для образца 3 ($T_{1\text{темн}} \approx 11,5 \text{ час}$) по сравнению с образцом 1 ($T_{1\text{темн}} \approx 200 \text{ час}$) обусловлено большей концентрацией локализованных на донорных атомах электронов, которые являются центрами релаксации для ядер Si^{29} . Скорость релаксации ядер Si^{29} в образце 2 ($T_{1\text{темн}} \approx 8,5 \text{ час}$) была увеличенной по сравнению с образцом 3 из-за возможного присутствия нейтральных парамагнитных атомов золота.

Из результатов проведенных экспериментов и сравнения их с результатами работы [1] видно, что при оптической накачке в кремнии, содержащем большое количество донорных атомов (образец 3), ядерная поля-

ризация устанавливается за меньшее время, чем в кремнии с малой концентрацией донорной примеси, однако, при этом наблюдается сильное уменьшение степени поляризации ядер Si^{29} . Это связано с тем, что степень поляризации электронов в зоне проводимости уменьшается из-за присутствия в ней имеющих равновесную поляризацию тепловых электронов, концентрация которых сравнима или даже превосходит концентрацию фотовозбужденных электронов.

В образцах со значительным содержанием парамагнитных примесей существенную роль в процессе динамической поляризации ядер играет фактор утечки ядерной поляризации вследствие ядерной релаксации на этих примесях [2]. Для образца 3 фактор утечки f оказался равным 0,61.

При облучении образца 2 неполяризованным светом с энергией фотонов, меньшей ширины запрещенной зоны, было обнаружено уменьшение времени релаксации ядер Si^{29} без оптической ориентации, что, по-видимому, объясняется изменением зарядового состояния золота с образованием парамагнитных центров. В этом случае в магнитном поле $H_0 = 4,9 \text{ кГс}$ при $T = 77\text{К}$ равновесная ядерная поляризация устанавливается с временем релаксации $T_1 \approx 4 \text{ час}$, что приводит к фактору утечки $f \approx 0,25$. Однако, несмотря на малое значение f , в образце 2 за короткое время достигается значительная степень поляризации ядер. Как отмечалось выше, это связано с увеличением степени поляризации электронов в зоне проводимости за счет уменьшения их времени жизни, а также с отсутствием тепловых электронов.

Таким образом, использование кремния n -типа, компенсированного глубокими акцепторными примесями, например золотом, позволяет за короткое время получить значительную степень поляризации ядер Si^{29} .

Мы благодарны М.И.Дьяконову и В.П.Перелю за полезные дискуссии.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 апреля 1976 г.

Литература

- [1] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
- [2] А.Абрагам. Ядерный магнетизм, ИИЛ, 1963.
- [3] W.D.Davis. Phys. Rev., 114, 1006, 1959.