

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ДОНОРНЫХ УРОВНЕЙ НА СТЕПЕНЬ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЯДЕР ^{29}Si В КРЕМНИИ

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

Исследована оптическая ориентация ядерных моментов ^{29}Si в кремнии, содержащем фосфор и примесь гадолиния, который вызывает смещение донорных уровней фосфора вглубь запрещенной зоны. Показано, что, увеличивая глубину залегания донорных уровней, можно получить очень большие степени оптической поляризации ядер.

В работе [1] показана возможность увеличения степени поляризации ядер ^{29}Si в кремнии при оптической накачке путем введения атомов золота, уменьшающих время жизни фотовозбужденных электронов.

В настоящей работе исследуется влияние глубины локализации донорной примеси на поляризацию ядер ^{29}Si . Исследования проводились на кремнии, легированном гадолинием до $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и содержащем фосфор в концентрации $\sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Введение в кремний примесей редкоземельных элементов смещает донорный уровень фосфора вглубь запрещенной зоны, увеличивая энергию ионизации примерно в полтора раза [2].

Эксперименты проводились по методике, описанной в работе [3]. Степень поляризации ядер ^{29}Si измерялась методом ЯМР. После облучения циркулярно поляризованным светом в магнитном поле $H_0 \sim 5 \text{ э}$ при $T = 77\text{К}$ в течение 10 часов в кремнии с примесью гадолиния и фосфора получена поляризация ядер ^{29}Si равная $2,6 \cdot 10^{-3}\%$, что соответствует равновесной поляризации в магнитном поле 10^5 э при $T = 77\text{К}$. По произведенной оценке время спин-решеточной релаксации ядер ^{29}Si в присутствии света $T_1 = 13,5 \text{ час}$. При этом значение ядерной поляризации, экстраполированное к бесконечному времени облучения, оказалось $6,8 \cdot 10^{-3}\%$.

Степень ядерной поляризации P , возникающей в полупроводнике при оптической накачке циркулярно поляризованным светом, определяется соотношением [1]

$$P = \frac{g_+ - g_-}{g_+ + g_-} \frac{\tau_s}{\tau + \tau_s}, \quad (1)$$

где τ_s – время спиновой релаксации электронов; τ – время жизни фотовозбужденных электронов; g_+ и g_- – скорости генерации в зоне проводимости электронов с проекцией спина $S_z = \frac{1}{2}$ и $S_z = -\frac{1}{2}$, соответственно; P связана со средней проекцией ядерного спина $\langle I_z \rangle$ выражением $P = 2 \langle I_z \rangle$.

В наших экспериментах величина $\frac{g_+ - g_-}{g_+ + g_-} = 0,08$. Это значение было

получено путем определения вероятностей переходов из валентной зоны

в зону проводимости под действием циркулярно поляризованного света с созданием электронов с проекциями спина $\frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$, соответственно.

При этом учитывалась степень эллиптичности циркулярно поляризованного света накачки, которая в наших опытах равнялась 12%. Для сравнения эффективности оптической накачки в кремнии, содержащем Gd и без него, были проведены эксперименты с кремнием, содержащим только атомы фосфора ($\sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Результаты измерения степени поляризации P ядер ^{29}Si и времени спин-решеточной релаксации T_1 приведены в таблице. В этой таблице также приведены значения времени жизни τ , измеренные для наших образцов при $T = 77\text{K}$.

Из выражения (1) следует, что степень поляризации ядер ^{29}Si зависит от τ и τ_s , причем с ростом τ величина P должна уменьшаться. В кремнии, легированном гадолинием, $\tau \approx 120 \text{ мксек}$, однако степень поляризации ядер оказалась значительно большей, чем в кремнии с фосфором, где $\tau \approx 70 \text{ мксек}$, а также большей, чем в кремнии, компенсированном золотом, где $\tau \sim 10^{-8} \text{ сек}$, а $P = 1,3 \cdot 10^{-3}\%$ [1]. Наблюдающееся увеличение поляризации ядер ^{29}Si в кремнии с Gd объясняется значительным увеличением времени спиновой релаксации электронов τ_s (см. таблицу), что в свою очередь объясняется следующим.

С увеличением глубины локализации донорного уровня происходит уменьшение частоты перескоков между донорными уровнями и зоной проводимости. Кроме того возрастает степень заполнения донорных центров электронами при облучении светом. Возрастание при этом величины τ_s позволяет считать, что спиновая релаксация электронов происходит в основном на донорных центрах. В этом случае скорость спиновой релаксации можно определить из соотношения [4]

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{2}{3} \frac{\omega_c^2 \gamma}{\gamma^2 + \Omega_e^2}, \quad (2)$$

где $\Omega_e = \gamma_e H_0$ — ларморовская частота локализованного электрона в магнитном поле H_0 , $\gamma_e \approx 1,75 \cdot 10^7 \text{ ич/э}$; γ — частота перескоков электрона между зоной проводимости и донорным уровнем (с учетом смещения донорного уровня $\gamma \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$); $\omega_c^2 = \gamma_e^2 H_n^2$, здесь H_n — эффективное поле ядер ^{29}Si на электронах [4].

Мы вычислили H_n^2 для случая контактного взаимодействия между электроном, локализованным на донорном центре, с окружающими ядрами ^{29}Si и по (2) оценили время τ_s (см. таблицу). Рассчитанное время τ_s хорошо совпало со значением $\tau_s \text{ эксп}$, определенным из экспериментальной величины P и измеренного времени τ (см. (1)).

Образец		$P, \%$	$T_1, \text{час}$	$\tau, \text{сек}$	$\tau_s, \text{сек}$
Si < P >	эксп.	$3,6 \cdot 10^{-4}$	8,5	$7 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-9}$
Si < P + Gd >	теор.	$8,7 \cdot 10^{-3}$	—	—	$1,3 \cdot 10^{-7}$
	эксп.	$6,8 \cdot 10^{-3}$	13,5	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$

Таким образом, показано, что увеличивая глубину залегания донорных уровней можно получить очень большие степени поляризации ядер-

ных моментов при оптической накачке вследствие увеличения времени спиновой релаксации электронов.

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

Поступила в редакцию
22 июля 1976 г.

Литература

- [1] Н.Т.Баграев, Л.С.Власенко, Р.А.Житников. Письма в ЖЭТФ, 23, 639, 1976.
 - [2] Г.И.Воронкова, М.И.Иглицын. А.Р.Салманов. ФТП, 8, 1607, 1974.
 - [3] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
 - [4] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. ЖЭТФ, 65, 362, 1973.
-