

О. о. ядерных спинов. Наиб. эффективно ядерная поляризация осуществляется за счёт сверхтонкого взаимодействия электронов, локализованных на донорной примеси, причём для мелких уровней электроны взаимодействуют с большим числом ядер (напр., 10^5 для GaAs). При этом действующее на электрон ср. суммарное поле всех ядер ($H_{Я}$), находящихся в области локализации этого электрона, даже при незначит. степени поляризации ядер ($P_{Я}$) может быть большим (в GaAs $H_{Я}$ достигает десятков кЭ). Одновременно на каждое ядро со стороны ориентиров. электронов действует флуктуирующее во времени (из-за рекомбинации и спиновой релаксации) поле электронов, ср. величина к-рого H_e пропорц. $\langle S \rangle$, и при полной поляризации электронов ($\langle S \rangle = 1/2$) измеряется десятками Э. В результате в электронно-ядерной спин-системе в условиях О. о. действует внутр. обратная связь, т. к. величина $\langle S \rangle$ определяется суммарным полем $H_{Я} + H$ (H — внеш. поле), а величина $H_{Я}$ в свою очередь зависит от $\langle S \rangle$ (рис. 3, а).

гии ядерных спинов в их локальном поле $H_{Я}$, созданном на данном ядре всеми остальными ядрами. Согласно теории:

$$\theta^{-1} = 4IH\langle S \rangle / \mu(H^2 + H_{Я}^2),$$

где I и μ — спин и магн. момент ядра. Мерой θ в поле H служит ср. спин ядер:

$$\langle I \rangle = 1/3(I + 1)\mu\theta^{-1}H$$

($H_{Я}$ пропорц. $\langle I \rangle$). После выключения поля H поляризация ядер исчезает ($\langle I \rangle \rightarrow 0$) и величина θ не может быть измерена непосредственно. Однако, т. к. спин-решёточная связь мала, состояние с уменьшенной величиной θ , соответствующее уменьшению числа возможных спиновых конфигураций, сохраняется в течение длит. времени $T_{Я}$. Если включить через время $t < T_{Я}$ измерительное поле $H_{изм} \perp \langle S \rangle$, то поляризация ядер вдоль $H_{изм}$ вызывает деполаризацию люминесценции в течение времени релаксации ЯСС.

При оптич. охлаждении ЯСС в кристаллах $Al^{III}V$ достигнуты $\theta \sim 1-5 \cdot 10^{-6}$ К, а для магниторазбавленной системы ядер ^{29}Si (4%) в кремнии получены $\theta \sim 10^{-4} \div 10^{-5}$ К.

Оптич. охлаждение ядер возможно также и в поле ориентиров. электронов H_e , если $H = 0$ или $H \perp \langle S \rangle$. В последнем случае поляризация ядер вдоль H может усиливать или ослаблять деполаризирующее действие H в зависимости от взаимной ориентации H и $H_{Я}$. На рис. 4 показана кривая $\rho(H)$ для кристалла AlGaAs, в

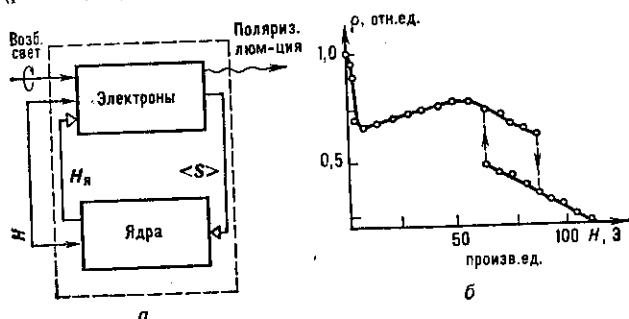


Рис. 3. Нелинейность поляризации электронно-ядерной спин-системы (ЭЯСС) полупроводника в условиях оптической ориентации: а — схема внутренней обратной связи в ЭЯСС; б — бистабильность поляризации ЭЯСС кристалла $Al_{0,24}Ga_{0,76}As$ при $T=77$ К и угле $\phi=3^\circ$ между H и осью (110) кристалла, возбуждаемого светом вдоль оси (100); в — неустойчивость поляризации ЭЯСС при $\phi = 6^\circ$ (1) и $\phi = 9,5^\circ$ (2).

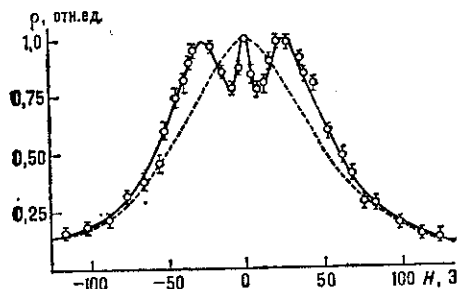
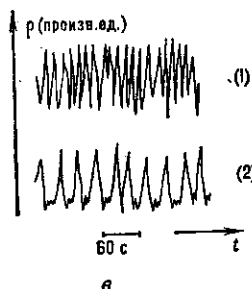


Рис. 4. Магнитная деполаризация люминесценции кристалла $Al_{0,24}Ga_{0,76}As$ при $T=77$ К и $\phi=45^\circ$; при $H=H_{Я}$ $\rho(H)=\rho(0)$.

Поведение электронно-ядерной спин-системы в условиях О. о. описывается системой связанных нелинейных ур-ний. При определённой пространственной структуре поля $H_{Я}$ есть области решений, где поляризация электронов и ядер бистабильна (рис. 3, б), а также решение, к-рое неустойчиво, что соответствует возникновению незатухающих колебаний (рис. 3, в). Бистабильность и неустойчивость поляризации люминесценции наблюдались при О. о. в твёрдых растворах $Al_xGa_{1-x}As$, в к-рых существенную роль играет локальное нарушение кубич. симметрии, вызванное частичным замещением атомов Ga на Al. Период незатухающих колебаний ρ в зависимости от внеш. условий изменялся в диапазоне 10—50 с. Нелинейные эффекты — следствие коллективного характера электронно-ядерных взаимодействий при О. о. Они наблюдались в диапазоне $H \sim 0,1-1000$ Э.

к-ром $H_{Я} \uparrow H$. При $H = H_{Я}$ действие поля компенсируется и величина $\rho(H)$ восстанавливается до значения $\rho(0)$. Пунктир — зависимость $\rho(H)$ для электронов при $H_{Я} = 0$. Действие света имеет следствием охлаждение ЯСС, а поляризация ядер возникает в результате установления термодинамич. равновесия во внеш. поле в условиях низкой спиновой темп-ры.

Оптическое детектирование парамагнитного резонанса. В условиях накопления поляризации ядер на электронные спины кроме внеш. поля действует эффективное поле ядер $H_{Я}$, что влияет на вид зависимостей $\rho(H)$ и позволяет оптически детектировать ЯМР в малых объёмах ($\sim 10^{-7}$ см³) при поглощении света в приповерхностном слое с толщиной меньше 1 мкм. Значит, поляризация ядер, к-рая может быть получена в условиях оптич. охлаждения их спин-системы, позволяет обнаружить ЯМР в слабых внеш. магн. полях. Уменьшение $H_{Я}$ в результате деполаризации ядер в условиях резонанса приводит к изменению поляризации люминесценции, что и делает возможным оптич. детектирование ЯМР. При этом удаётся наблюдать резонансные переходы с одноврем. переворотом спинов как в одной, так и в разных подрешётках кристалла (рис. 5).

В условиях О. о. ядерный резонанс можно возбудить без внеш. магн. поля H , если промодулировать поляризацию или интенсивность возбуждающего света с частотой вблизи частоты ларморовой прецессии ядерных спинов в поле $H_e \propto \langle S \rangle$. В этом случае роль внеш. поля H играет осциллирующее поле электронов H_e .

Оптическое охлаждение ядерной спин-системы (ЯСС). Энергетич. состояние ЯСС характеризуется спиновой темп-рой θ , которая определяется спин-спиновым взаимодействием ядер. Это взаимодействие значительно сильнее спин-решёточного, характеризующего обмен энергией между ЯСС и решёткой, что обеспечивает возможность достижения значений θ , на неск. порядков меньше темп-ры решётки T . Изменение ориентации ядер, вызванное взаимодействием с оптически ориентиров. электронами, сопровождается изменением энер-