

НЕРЕЗОНАНСНАЯ СПИН-ЗАВИСИМАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В КРЕМНИИ

Л. С. Власенко, В. А. Храмцов

Обнаружен новый эффект нерезонансного изменения фотопроводимости облученных кристаллов кремния в слабых магнитных полях. Показано, что этот эффект связан с процессами спин-зависимой рекомбинации фотовозбужденных носителей через триплетные центры, а изменение фотопроводимости в отсутствие резонансного переменного магнитного поля возникает в точках антипересечения магнитных подуровней триплетных центров.

В различных кристаллах кремния *n*- и *p*-типа, облученных электронами или γ -квантами, было обнаружено изменение фотопроводимости в слабых магнитных полях, имеющее вид узких линий, подобных сигналам ЭПР. Это изменение фотопроводимости наблюдалось в отсутствие резонансного переменного магнитного поля по изменению добротности резонатора спектрометра ЭПР.

На рис. 1 показаны сигналы изменения добротности резонатора за счет изменения фотопроводимости кристаллов кремния, зарегистрированные на спектрометре ЭПР трехсантиметрового диапазона. Регистрировалась вторая производная сигналов.

В чистых кристаллах кремния, выращенных методом бестигельной зонной плавки и содержащих кислород с концентрацией $N_0 < 10^{16} \text{ см}^{-3}$; после облучения γ -квантами дозой $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдается сигнал изменения фотопроводимости в магнитном поле $H = 387,6 \text{ Гс}$ в ориентации $H \parallel \langle 111 \rangle$ кристалла (рис. 1, а). В кислородосодержащем кремнии ($N_0 \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$), облученном γ -квантами дозой $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$ также наблюдается изменение фотопроводимости, но в магнитном поле $H = 351,6 \text{ Гс}$ и в ориентации $H \parallel \langle 110 \rangle$ (рис. 1, б). Такие же сигналы были обнаружены в кристаллах кремния, облученных электронами с энергией 1 МэВ и дозами от 10^{13} см^{-2} до 10^{17} см^{-2} . В необлученных образцах сигналы не наблюдались.

Отметим общие закономерности наблюдаемого эффекта. Линии, показанные на рис. 1, наблюдаются только при освещении кристаллов собственным светом. Положение и интенсивность линий не зависят от частоты и амплитуды СВЧ-поля в резонаторе. Отклонение направления магнитного поля от осей $\langle 111 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$ кристаллов приводит к уширению линий и уменьшению их интенсивностей. При отклонении на угол $\pm 5^\circ$ линии уже не наблюдаются. Знак наблюдаемых сигналов противоположен знаку обычных сигналов поглощения ЭПР и соответствует увеличению добротности резонатора радиоспектрометра. Максимальная интенсивность регистрируемых сигналов наблюдалась в диапазоне температур 20 – 30 К.

Совокупность полученных экспериментальных результатов позволяет предположить, что изменение добротности резонатора происходит в результате изменения фотопроводимости образца, которое обусловлено процессами спин-зависимой рекомбинации фотовозбужденных носителей через парамагнитные центры, имеющие "особые" точки при значениях магнитного поля 387,6 Гс и 351,6 Гс. Такими центрами могут быть триплетные центры, имеющие

при этих значениях магнитного поля точки антипересечения уровней, а оси $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ являются главными осями симметрии этих центров.

Действительно, в кислородосодержащем кремнии наблюдался спектр ЭПР Si-SL1¹, соответствующий возбужденным триплетным состояниям комплексов кислород + вакансия, образующимся при облучении, с константами $D = 352$ Гс и $E = 7,7$ Гс. Si-SL1-центр является почти аксиально симметричным с осью симметрии $\langle 110 \rangle$, и точкой антипересечения уровней ~ 352 Гс. Таким образом, линию, приведенную на рис. 1, б, можно связать с этим центром.

В бескислородном кремнии наблюдался спектр ЭПР триплетных центров, обозначенный Si-PT1², имеющий ось симметрии $\langle 111 \rangle$ и константу $D = 430$ Гс. Константу E определить не удалось, так как спектр ЭПР этих центров наблюдается только в ориентациях, близких к $H \parallel \langle 111 \rangle$. Если связать линию, приведенную на рис. 1, а с Si-PT1-центром, то можно определить константу E из соотношения $H_0^2 = D^2 - E^2$, где $H_0 = 387,6$ Гс – точка антипересечения уровней $|0\rangle$ и $|-1\rangle$ центров Si-PT1, $E = 183$ Гс.

Для проверки того, что наблюдаемые линии нерезонансного изменения фотопроводимости облученных кристаллов связаны с точками антипересечения магнитных подуровней триплетных центров, были проведены эксперименты по резонансному насыщению переходов триплетных центров вблизи точек антипересечения уровней и регистрации спин-зависимой рекомбинации через эти центры. Насыщение резонансных переходов осуществлялось переменным магнитным полем с частотой от 135 до 900 МГц, создаваемым, катушкой, помещенной в резонатор радиоспектрометра вблизи образца.

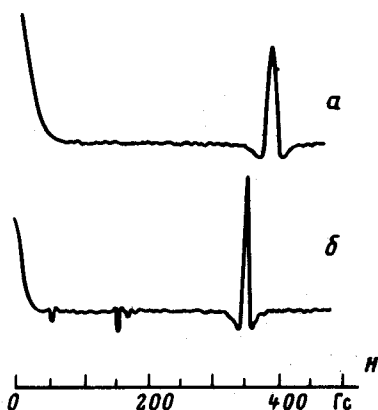


Рис. 1

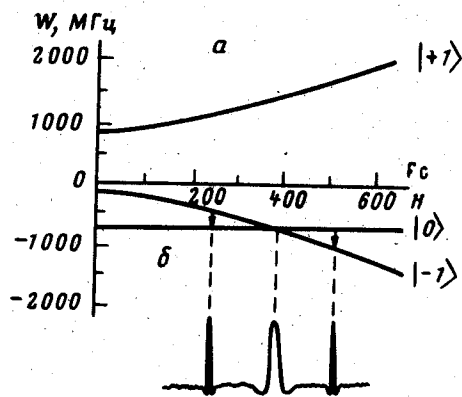


Рис. 2

Рис. 1. Сигналы изменения фотопроводимости γ -облученных кристаллов кремния: а – для бескислородного кремния, $H \parallel \langle 111 \rangle$, б – для кислородосодержащего кремния, $H \parallel \langle 111 \rangle$

Рис. 2. Схема энергетических уровней центра Si-PT1 в магнитном поле $H \parallel \langle 111 \rangle$ (а), спектр ЭПР, полученный при частоте резонансного поля 300 МГц (б)

На рис. 2 приведена схема энергетических уровней Si-PT1 – центра, рассчитанная на основе полученных параметров D и E (а) и наблюдающийся спектр ЭПР (б), зарегистрированный по изменению добротности резонатора. Частота переменного магнитного поля была равной 300 МГц. Положение резонансных линий хорошо совпадает с переходами между рассчитанными уровнями. Следует отметить, что амплитуда резонансных линий в этих экспериментах практически не зависела от частоты переменного поля в диапазоне 135 – 900 МГц.

Таким образом, эффекты спин-зависимой рекомбинации могут возникать не только при резонансном насыщении ЭПР переходов, но и в отсутствие резонансного поля, в "особых" точках энергетического спектра парамагнитных центров, таких, как точки антипересечения магнитных подуровней триплетных центров, где происходит смешивание состояний $|-1\rangle$ и $|0\rangle$. Такое же смешивание происходит и в нулевых магнитных полях и оно, по-видимому, является ответственным за изменение фотопроводимости в магнитных полях 0 – 50 Гс

(рис. 1). В спектре, приведенном на рис. 1, б видны также слабые линии с другой фазой. Эти линии принадлежат другим парамагнитным центрам в кристалле, но в настоящее время природа их точно не установлена.

В заключение можно сделать следующие выводы. Впервые наблюдались процессы спин-зависимой рекомбинации через триплетные центры в слабых магнитных полях в кристаллах кремния, содержащих радиационные дефекты. Обнаружен новый эффект нерезонансного изменения фотопроводимости кристаллов в магнитных полях, соответствующих точкам антипересечения магнитных подуровней триплетных центров. К настоящему времени процессы спин-зависимой рекомбинации в кристаллическом кремнии изучены лишь на ограниченном числе центров. Это поверхностные центры³ и дислокации в пластически деформированном кремнии⁴. Полученные в настоящей работе результаты открывают новые возможности для исследования спин-зависимой рекомбинации на различных дефектах в полупроводниках.

Авторы выражают благодарность член-корреспонденту АН СССР Б.П.Захарчене за полезные дискуссии и постоянное внимание к работе.

Литература

1. *Brower K.L. Phys. Rev. B, 1971, 4, 1968.*
2. *Власенко Л.С., Власенко М.П., Храмцов В.А. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 1529.*
3. *Lepine D. Phys. Rev. B, 1972, 6, 436.*
4. *Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Шальгин А.И. ЖЭТФ, 1982, 83, 699.*

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

Поступила в редакцию
22 мая 1985 г.