

ОБРАЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ ЭЛЕКТРОН-НЕЙТРАЛЬНЫЙ ДОНОР ПРИ НЕПРЯМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДАХ В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ

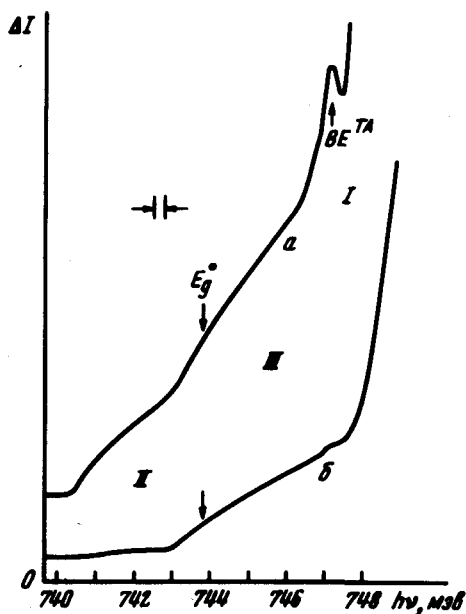
Б.В.Новиков, Н.С.Соколов, С.В.Холодkevич

В спектральном распределении фотопроводимости кристаллов германия, содержащих мелкие доноры, обнаружена структура, обусловленная непрямыми оптическими переходами электронов из валентной зоны на уровни комплексов электрон-нейтральный донор.

В работе [1] была высказана мысль о возможности существования в полупроводниковых кристаллах электронно-примесных комплексов, состоящих из нейтральных доноров и связанных с ними электронов. Сходство электронной структуры этих комплексов со структурой отрицательных ионов водорода H^- позволило оценить энергию связи электрона с нейтральным донором. Эта энергия, согласно [1], должна составлять около $1/20$ от энергии ионизации донора. В дальнейшем электронно-примесный комплекс, состоящий из нейтрального донора и электрона, мы для краткости будем называть D^- -комплексом.

Исследование D^- -комплексов представляет значительный интерес, поскольку имеется ряд данных, свидетельствующих об их важной роли в рассеянии [2] и рекомбинации [3, 4] носителей тока при низких температурах, в механизме проводимости по примесям [5] и других явлениях [6].

Нами было предположено, что в спектрах поглощения и фотопроводимости (ФП) вблизи непрямого края собственного поглощения германия могут наблюдаться особенности, обусловленные переходом электронов из валентной зоны на уровни D^- -комплексов. Поскольку при таких переходах создаются D^- -комплексы и свободные дырки, эти особенности в спектрах поглощения и ФП должны иметь форму "ступенек", характерную для переходов уровень – зона. Так как энергия связи D^- -комплексов на мелких донорах в германии не превосходит 1,6 мэв [7], а энергия связи непрямого экситона составляет 3,8 мэв [8], спектр поглощения, обусловленный созданием этих примесных комплексов, может быть замаскирован относительно интенсивным непрямым экситонным поглощением. Действительно, анализ спектров поглощения легированного германия, полученных в [9], а также в настоящей работе, не обнаружил структуры, которую можно было бы идентифицировать с обсуждавшимся выше механизмом образования D^- -комплексов. В связи с тем, что эффективность механизмов образования носителей тока при распаде экситонов и при оптических переходах с образованием D^- -комплексов может быть различной, нам представлялось интересным проанализировать спектральное распределение ФП вблизи края собственного поглощения.



Спектр фотопроводимости кристалла германия, содержащего $2 \cdot 10^{15}$ атомов Sb в 1 см^3 при различных температурах: а – $T = 4,2^\circ\text{K}$, б – $T = 1,7^\circ\text{K}$

Исследовалось спектральное распределение ФП в кристаллах германия, легированных донорами Sb, P и As в бесфононной области и в области переходов с возбуждением TA- и LA-фононов. Типичный размер

образца составлял $2 \times 5 \times 4 \text{ мм}^3$. Контакты наносились на две меньшие грани методом сплавления сплава $\text{In} - \text{As}$ в вакууме. Регистрация сигнала ФП велась на частоте 600 Гц с использованием механического модулятора интенсивности светового пучка и схемы синхронного детектирования.

На рисунке представлены спектры ФП кристалла германия, содержащего $2 \cdot 10^{15}$ атомов Sb в 1 см^3 . На этих спектрах отчетливо видны три ступеньки фототока, обусловленные различными механизмами поглощения и ФП. Ступенька I связана с одновременным возбуждением непрямых экситонов и TA -фононов, обеспечивающих выполнение закона сохранения волнового вектора. Естественно, что эта ступенька наблюдается в спектрах поглощения и фототока как чистых, так и легированных различными примесями кристаллов. Ступенька II обусловлена бесфононным созданием непрямых экситонов с одновременным упругим рассеянием на атомах примеси. Эта ступенька присутствует в спектрах поглощения и ФП кристаллов, содержащих как донорные [9]¹⁾, так и изоэлектронные примесные центры [10]. Энергетическое положение ступенек I и II относительно края запрещенной зоны E_g^0 не зависит от природы примесей, а определяется энергией TA -фонона и энергией связи непрямого экситона, т. е. свойствами кристаллической решетки германия.

Ступенька III наблюдается только в кристаллах германия, содержащих донорные центры. Малая степень компенсации образцов (менее 10%), использовавшихся в настоящих экспериментах, а также небольшая величина напряженности поля (1 в/см), при которой изучалась ФП дают основание считать, что ступенька III обусловлена наличием в кристалле нейтральных донорных центров. Форма наблюдаемой особенности — ступенька — свидетельствует о том, что переход идет между уровнем и зоной. Энергетическое положение этой ступеньки зависит от вида основной примеси. Так, начало ступеньки III смещено относительно E_g^0 в область меньших энергий в кристаллах германия, легированных сурьмой на $1,0 \pm 0,2 \text{ мэв}$, фосфором — на $1,3 \pm 0,2 \text{ мэв}$ и мышьяком²⁾ — на $1,6 \pm 0,2 \text{ мэв}$. Величины этих смещений находятся в хорошем соответствии с энергиями связи электрона с нейтральными донорами в германии, полученными в [7] при изучении спектров ФП в далекой инфракрасной области. Это позволяет сделать вывод о том, что наблюдаемая в спектре ФП ступенька III обусловлена непрямым бесфононным переходом электрона из валентной зоны на уровень D^- -комплекса. Аналогичные не прямые переходы с возбуждением LA -фононов наблюдались нами в спектрах ФП в области более высоких энергий.

¹⁾ Бесфононное образование свободных экситонов с рассеянием на атомах сурьмы является значительно менее эффективным по сравнению с аналогичным процессом с участием атомов фосфора или мышьяка [9] и, насколько нам известно, в настоящей работе оно наблюдается впервые.

²⁾ В спектрах ФП кристаллов германия, легированных мышьяком или фосфором, помимо ступенек I, II и III в бесфононной области наблюдается группа линий, обусловленных созданием и фотоактивным распадом экситонов, связанных на нейтральных донорах.

Линия BE^{TA} , расположенная вблизи начала ступеньки I, обусловлена образованием и фотоактивным распадом экситонов, связанных на нейтральных донорах сурьмы. Ширина этой линии в спектрах ФП, приведенных на рисунке, определяется спектральной шириной щели монохроматора, которая в данном случае составляла 0,3 мэв.

Сравнение спектров *a* и *b*, приведенных на рисунке, показывает, что при понижении температуры от 4,2 до 1,7°K величина фототока, обусловленного созданием и фотоактивным распадом экситонов, значительно уменьшается, тогда как фототок в ступеньке III (за вычетом вклада от ступеньки II) заметным образом не меняется. Это свидетельствует о том, что механизмы возникновения носителей тока при распаде экситонов и при поглощении света в ступеньке III различны. По-видимому, это различие и обеспечивает возможность наблюдения структуры в спектре ФП, которую не удастся непосредственно обнаружить в спектре коэффициента поглощения.

Авторы выражают благодарность А.В.Ильинскому за обсуждение результатов работы.

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

Поступила в редакцию
13 февраля 1974 г.

Литература

- [1] M.Lampert. Phys. Rev. Lett., I, 450, 1958.
- [2] A.Honig, N.Lagnado. Proc. X Int. Conf. Phys. Semicond., Boston, 1970, p 809.
- [3] P.J.Dean, J.R.Haynes, W.F.Flood. Phys. Rev., 161, 711, 1967.
- [4] Е.М.Гершензон, Ю.П.Ладыжинский, А.П.Мельников. Письма в ЖЭТФ, 14, 380, 1971.
- [5] E.A.Davis, W.D.Compton. Phys. Rev., 140, A2183, 1965.
- [6] Y.Nisida, K.Horii, K.Muro. Proc. 11th Int. Conf. Phys. Semicond, Warshawa, , 1972. p.224.
- [7] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, А.П.Мельников. Письма в ЖЭТФ, 14, 281, 1971
- [8] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицына. Письма в ЖЭТФ, 18, 160, 1973.
- [9] B.Ayrault, G.Duraffourg. Proc. Proc. IX Int. Conf. Phys. Semicond., Москва, 1968, p.440; B.Ayrault, These, Paris, 1970.
- [10] В.И.Сафаров, А.Н.Титков. ФТТ, 14, 458, 1972.