

ОПТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННОЕ ЛОКАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

И.А. МАМЕДБЕЙЛИ, Г.Н. НАСИБОВ, Ч.О. КАДЖАР,
Институт Фотозлектроники АН Азербайджанской Республики
370141, г. Баку, ул. Ф. Агаева, 555 кв.

В.М. САЛМАНОВ
Бакинский Государственный Университет им. М.А. Расулзаде
370148, г. Баку, ул. З. Халилова, 23

Методом оптически индуцированного локального поглощения исследованы кристаллы высокоомного InP(Fe) и InSe. В обоих кристаллах наблюдалось оптическое усиление и оптическое гашение фотопроводимости. Для InP(Fe) природа этого процесса связывается с возбуждением микрообъемов, содержащих центры с отрицательной корреляционной энергией. В InSe это связывается с неоднородностью распределения примесей и дефектов. Оценены размеры подобных микрообъемов в InP(Fe), которые составили величину $\sim 10^3$ см², а в InSe оценена концентрация г-медленных центров рекомбинации, составившая величину $2-5 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

Введение.

Широкозонные ($\geq 1,5$ eV) полупроводниковые кристаллы, как правило, обладают богатым спектром локальных состояний в запрещенной зоне. Эти состояния оказывают существенное, а иногда и определяющее влияние на генерационно-рекомбинационные процессы. Даже достаточно чистые монокристаллы могут содержать заметное их количество. Конечно, здесь имеются в виду большие, объемные кристаллы, используемые в качестве, например, подложки для выращивания различных полупроводниковых структур, электрооптических модуляторов и т.п. Как правило, в процессе поглощения локальные состояния могут выполнять роль центров прилипания или центров рекомбинации. Природа этих локальных состояний может быть различной. Это могут быть просто примеси или примесный фон, дефекты различных типов или дефектные ассоциации. Эффективно исследовать поведение локальных центров можно различными методами. Широкое распространение получил метод оптически индуцированного поглощения [1-3], когда на образец направляется два луча, один из них промодулирован и выбирается с фиксированной длиной волны, попадающий в область поглощения, второй - зондирующий луч, не модулирован, и его длина волны сканируется в широком диапазоне. Регистрация сигнала идет по второму - зондирующему лучу, который оказывается промодулированным за счет индуцированного поглощения. В первом приближении все выглядит именно так. Однако исследование фотозлектрооптического эффекта в полупроводниковых кристаллах кубической симметрии показали, что для полноты представлений о поведении локальных центров следует учитывать, что они распределены в объеме кристалла существенно неоднородно и при этом неоднородность эта связана не только с концентрацией локальных центров, но и со значительным отличием их физического состояния [4-6]. Типичный пример экспериментального наблюдения неоднородности распределения локальных

центров - широко распространенное т.н. оптическое гашение в полупроводниковых кристаллах.

Чтобы экспериментально обнаружить подобного рода неоднородности, следует воспользоваться разработанной нами методикой оптически индуцированного локального поглощения, согласно которой существенно локализуется как область поглощаемой подложки, так и размеры зондирующего луча. Используя эту методику была показана возможность наблюдения оптического "усиления" в таком известном и хорошо изученном материале, как полупроводниковый GaAs компенсированный Cr [7].

В настоящей работе сообщается о результатах исследования оптически индуцированного поглощения в монокристалле InP компенсированного Fe и слюстом кристалле InSe. Первый - типичный представитель изотропных кубических кристаллов, второй - низкосимметричный ромбоэдрический. Этот факт представляется весьма важным из общезначимых соображений и из желания обобщить накопленный экспериментальный материал.

Методика эксперимента.

В общем виде схема эксперимента выглядит анагично описанной в [7]. На образец, к которому через нагрузочное сопротивление R приложено постоянное электрическое поле E, падает модулированный зондирующий луч сфокусированный оптической системой от первого источника излучения. Сигнал фотодиода с нагрузочного сопротивления R через развязывающую емкость регистрируется с помощью синхронного детектора. Опорный канал синхронного детектора загружается импульсами от оптопары диска модулятора. В качестве источника излучения может использоваться как монохроматизированное излучение обычных источников, так и излучение лазеров. На образец направляется еще один луч, выполняющий роль подсветки или накачки. Он формируется от второго источника оптической системой, которая должна иметь возможность сканировать пятно подсветки по поверхности образца (точнее в окрестностях пятна зондирующего

луча). Как правило, оба луча в диаметре выбираются не более 1 мм, а их мощности - не более 5 мВт.

Направив зондирующий луч на кристалл и зафиксировав величину фотоотклика, на образец подается второй луч подсветки, который сканируется кюветочным механизмом оптической системы вокруг первого луча до тех пор, пока не будет найдена точка на поверхности образца, освещение которой вызывает или уменьшение (гашение), или увеличение (усиление) сигнала фотоотклика.

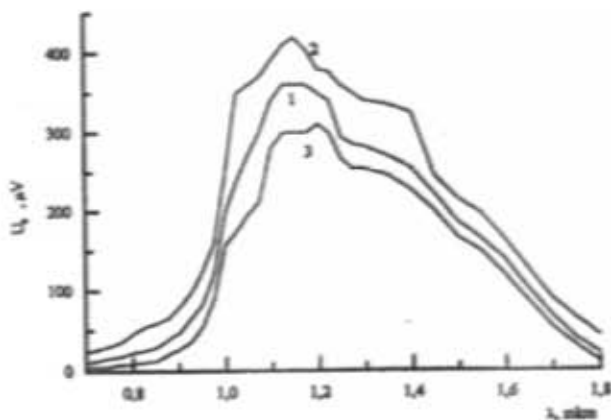


Рис. 1. Спектральная зависимость фототока кристалла InP(Fe): 1 - обычный фототок; 2 - фототок при усиливающей подсветке; 3 - фототок при ослабляющей подсветке.

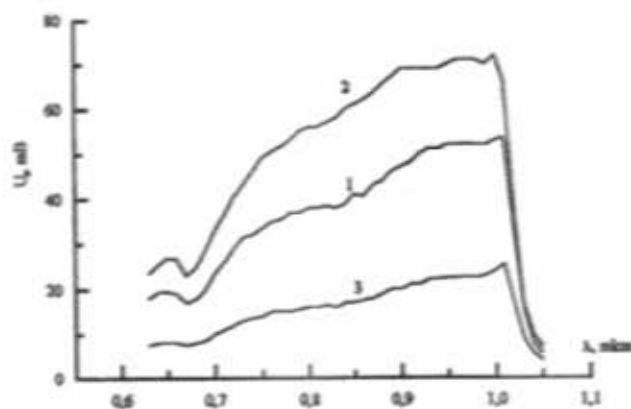


Рис. 2. Спектральная зависимость фототока кристалла InSe: 1 - обычный фототок; 2 - фототок при усиливающей подсветке; 3 - фототок при ослабляющей подсветке.

На рис. 1 и 2 показаны спектральные зависимости фототока при наличии подсветки стимулирующей процесс поглощения для кристаллов InP(Fe) и InSe. Кривые 1 - обычного фототока, кривые 2 и 3 получены при подсветке, увеличивающей (усиление) и ослабляющей (гашение) фототок соответственно.

Используемый в измерениях образец InP(Fe) имел геометрические размеры 3×3×30 мм, электроды располагались вдоль длинной грани, свет подавался на торцевую грань 3×3 мм. Поэтому на спектральных зависимостях фототок области примесного поглощения заметно превышает фототок вблизи края поглощения (~0,96 мкм).

Кристалл InSe скалывался вдоль слоев так, чтобы размеры вдоль слоя не превышали 2×2 мм. Оптическое индирование наносилось на эту грань и сюда же направлялось оптическое излучение. Поскольку толщина образцов не превышала 100-150 мкм, то в этом случае максимум фототока наблюдается в области края поглощения (~1 мкм).

Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Зависимости сигналов фототока и приращения фототока от подсветки для кристалла InP(Fe) остаются практически линейными в используемом диапазоне мощностей.

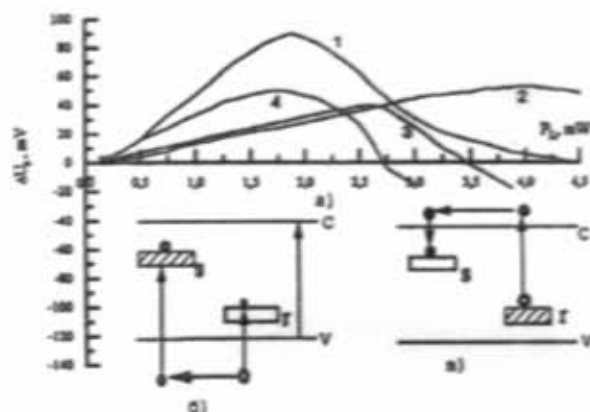


Рис. 3. а) Зависимости сигналов приращения фототока от мощности излучения локальной подсветки для кристалла InSe. б) возможная схема электронных переходов при ослабляющей подсветке. в) возможная схема электронных переходов при усиливающей подсветке.

Несколько иначе выглядят кривые зависимости сигналов приращения фототока от мощности излучения локальной подсветки для кристалла InSe представленные на рис. 3,а. Они получены при подсветке различных точек в окрестностях зондирующего луча. Вначале они плавно нарастают под различными углами, затем достигают максимума и даже спадают. Наблюдались точки, подсветка которых с ростом мощности приводила к инверсии знака приращения фотоотклика (кривые 3 и 4 рис. 3,а).

Поскольку ранее мы наблюдали стимулированное локальной подсветкой поглощение в кристаллах GaP, ZnSe, CdTe [8], то обобщая экспериментальные результаты, можно утверждать, что, видимо, у всех широкозонных высокоомных полупроводниковых кристаллов можно наблюдать эффект оптически индуцированного локального поглощения с характерным биполярным приращением фотоотклика в зависимости от условия подсветки. В полупроводниковых кристаллах с кубической симметрией природа этого процесса может быть связана с наличием в кристаллах так называемых U-центров с отрицательной корреляционной энергией [9].

Априори считается, что эти U-центры находятся в микрообъемах кристалла в различном зарядовом состоянии (с двумя, 1 - одним и 0 электронами) и имеют, таким образом различные конфигурационные координаты. Со-

ответственно преимущественное (за счет локализации подсветки) оптическое возбуждение тех или иных микрообъемов вызывает различное течение генерационно-рекомбинационных процессов. В частности, подсветка микрообъемов с преимущественным содержанием U -центров с двумя и одним электронами приведет к росту фотоносителей в зоне проводимости т.е. будет наблюдаться усиливающая точка. Подсветка микрообъемов с преимущественным содержанием U -центров с 0-электронами будет сопровождаться интенсивным двух электронным захватом и соответствующим уменьшением фотоносителей (гашение или ослабляющая точка). С учетом размеров излучения подсветки и соответствующего коэффициента поглощения размеры указанных микрообъемов могут составлять величину порядка 10^{-3} см³.

Для кристалла InSe наблюдавшиеся результаты можно объяснить иначе. Для слоистых кристаллов общепринятая модель фотопроводимости основана на наличии в запрещенной зоне рекомбинационных центров двух типов s -быстрых и r -медленных [10,11]. Но здесь мы должны сделать допущение, также не противоречащее общепринятым представлениям о том, что в кристалле имеются неоднородности распределения примесей и дефектов, причем как по концентрации, так и по степени занятости. При таком подходе возможны две схемы электронных переходов. В случае подсветки вызывающей гашение фотопроводимости возможна схема, показанная на вставке (б) рис. 3. Здесь r -центры свободны, s -частично заполнены. Переходы зона-зона проводимости обусловлены освещением зондирующего луча. Подсветка способствует генерации дырок с r -уровня, которые затем захватываются s -центрами, что приводит к увеличению темпа рекомбинации и к уменьшению фототока.

В случае подсветки усиливающей фотоотклик реализуется схема, показанная на вставке (в) рис. 3. Здесь r -уровни полностью или частично заполнены, а s -уровни свободны. В этом случае работает медленный канал рекомбинации. Электроны высвобождаются с r -уровней и захватываются свободными s -уровнями, а образовавшиеся на r -уровнях дырки медленно рекомбинируют с фотоэлектронами, что приводит к увеличению фотопроводимости с ростом мощности излучения подсветки и инверсии знака сигнала приращенния фотоотклика. Это происходит следующим образом, по мере роста интенсивности подсветки, r -уровни полностью опустошаются (рис. 3 (в)), а s -уровни заполняются. Когда r -уровни полностью опустошаются, дальнейший рост фототока невозможен, а s -уровни с ростом интенсивности подсветки продолжают заполняться за счет переходов из валентной зоны, и т.о. снова реализуется схема, показанная на рис. 3 (б). Поскольку инверсия знака ΔU_s для случая ослабляющей подсветки не наблюдалась, ясно, что при концентрации r -центров $N_r > N_s$ заселенность r -центров частичная, или эта заселенность меньше, чем концентрация s -центров $N_r < N_s$. В этом случае r -центры должны быть заполнены полностью, как показано на рис. 3 (в).

Исходя из предложенной модели, по положению максимума из кривых рис. 3, можно оценить концентрацию или заселенность r -центров. Так из кривых 1 и 4, для коэффициента поглощения 10^3 см⁻¹ и времени жизни фотоносителей 10^{-7} см эта величина равна $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³, а по данным кривой 2 равна $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, что составляет вполне разумную величину, не противоречащую литературным данным.

[1] Р.А. Ванем, П.А. Лыук, Г.П. Пека. ФТП, 1974, т.8, в.2, с.331-334.
 [2] Э.М. Омеляновский, А.Я. Поляков, Н.С. Рытова, В.Н. Райхштейн. ФТП, 1986, т.20, в.8, с.1428-1432.
 [3] О.В. Вакуленко, Г.Д. Мельников, В.А. Скрышевский. ФТП, 1982, т.16, в.10, с.1917-1921.
 [4] В.В. Воронков, Г.И. Воронкова, В.П. Калинушкин, Д.И. Мушин и др. ФТП, 1984, т.18, в.8, с.1363.
 [5] Н.Т. Баграев, Н.М. Калчанова, В.А. Машков. Письма в ЖЭТФ, 1987, т.45, в.5, с.231-234.
 [6] И.М. Аскеров, Ч.О. Каджар, И.А. Мамедбейли,

Э.Ю. Салаев. ФТП, 1984, т.18, в.10, с.1877-1879.
 [7] Э.Ю. Салаев, И.М. Аскеров, Ч.О. Каджар, И.А. Мамедбейли. ФТП, 1987, т.21, в.9, с.1664-1668.
 [8] Ч.О. Каджар, И.М. Аскеров, И.А. Мамедбейли и др. Труды XX Всесоюзного съезда по спектроскопии, 1988, Киев, Науково думка, часть 2, с.434-435.
 [9] N.T. Bagraev, V.A. Mashkov. Solid State Communications, 1984, v.51, n.7, pp.515-520.
 [10] F.N. Kaziev, M.K. Sheinkman, I.B. Ermolovich, G.A. Akhundov. Phys. Stat. Sol., 1969, 31, K59.
 [11] Г.А. Ахундов, Г.Л. Еленьский, Ф.Н. Казиев, А.А. Агаева, В.М. Салманов. Изв. Вузов СССР, 1972, 7, с.127.

I.A. Məmmədboyli, G.N. Nəsilbov, Ç.O. Qacar, V.M. Salmanov

GENİŞ BƏNDLİ YARIMKEÇİRİCİLƏRDƏ OPTİK İNDUKSİYALI LOKAL UDULMA

InP(Fe) və InSe kristalları optik induksiya lokal udulma metodu vasitəsi ilə tədqiq edilmişdir. Hər iki kristalda fotocerayanın optik azalması müşahidə olunmuşdur. InP(Fe) kristalında bu hadisə mənfi korrelyasiya enerjili mikrohəcmlərin fəaliyyətə gətirilməsi ilə əlaqələndirilmişdir. InSe kristalında isə bu hadisə qüsur və aşqarların paylanması qeyri-cinsliyi ilə əlaqələndirilmişdir. InP(Fe) kristal üçün həmin mikrohəcmlərin ölçülərinin 10^{-3} sm³-ə bərabər olduğu və InSe kristalında isə r -yavaş rekombinasiya mərkəzlərinin konsentrasiyasının $2 \cdot 5 \cdot 10^{15}$ sm⁻³-ə bərabər olduğu göstərilmişdir.

I.A. Mamedbeyli, H.N. Nasibov, Ch.O. Kajar, V.M. Salmanov

OPTICAL INDUCED LOCAL ABSORPTION IN WIDE BAND GAP SEMICONDUCTORS

In high-resistance InP(Fe) and InSe crystals have been studied by method of optical induced local absorption. An optical amplification and optical extinction of photoconductivity have been observed in both crystals. As for InP(Fe) that process is connected with excitement of micro volumes containing negative correlation energy centers. As to InSe that process is connected with non-uniformity of impurities and defects distribution. The sizes of similar microvolumes in InP(Fe) have been evaluated at $\sim 10^3 \text{ sm}^3$, and the concentration of τ -slow recombination centers in InSe have been evaluated at $2\text{-}5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$.

Дата поступления: 06.11.96

Редактор: Т.Р. Мехмаев