

Более того, величина концентрации таких сопутствующих дефектов, как показано на основе физико-химического анализа в [7], может на 2 порядка превышать значение концентрации ионизованных междоузельных атомов кадмия, что соответствует результатам данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пфанн В. Зонная плавка. М., 1970. 366 с.
- [2] Aven M., Woodbury H. H. // Appl. Phys. Lett. 1962. V. 1. N 3. P. 53—54.
- [3] Никонюк Е. С., Савицкий А. В., Грыцив В. И. и др. // УФЖ. 1974. Т. 19. В. 2. С. 1911—1913.
- [4] Агринская Н. В., Аркадьева Е. Н., Матвеев О. А. // ФТП. 1971. Т. 5. В. 5. С. 863—868.
- [5] Шкловский Б. И. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 7. С. 1197—1226.
- [6] Аскеров Б. М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М., 1989. 318 с.
- [7] Медведев С. А., Максимовский С. Н., Киселева К. В. и др. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1973. Т. 9. В. 3. С. 356—360.

Получено 12.11.1991

Принято к печати 26.12.1991

Черновицкий государственный университет
имени Ю. Федьковича

ФТП, том 26, вып. 5, 1992

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ В РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ С ДВУХКАНАЛЬНЫМ СТРОБ-ИНТЕГРАТОРОМ

Гордеев Д. М., Шмагин В. Б.

В последние годы заметен интерес к проблеме повышения разрешения в релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) — методе, успешно применяемом для исследования примесей и дефектов структуры, образующих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника [1]. Выделяются две тенденции в направленности публикуемых работ: 1) конструирование новых весовых функций, определяющих алгоритм обработки релаксационного сигнала в РСГУ [2,3]; 2) поиск возможностей повышения разрешения в рамках уже апробированных алгоритмов. Так, в [4] исследовано влияние положения строб-импульсов t_1 и t_2 на ширину линии в РСГУ с использованием двухканального строб-интегратора и показано, что добиться уменьшения ширины линии можно, регистрируя спектр при возможно меньшем отношении t_2/t_1 . Цель настоящей работы состоит в поиске возможностей дальнейшего уменьшения ширины линий в РСГУ с двухканальным строб-интегратором.

1. Известно, что форма линии в РСГУ с двухканальным строб-интегратором описывается следующими выражениями [1]:

$$S(T) = \exp[-t_1/\tau(T)] - \exp[-t_2/\tau(T)], \quad (1)$$

$$\tau(T) = \frac{1}{AT^2} \exp(E/kT), \quad (2)$$

где $S(T)$ — контур линии, t_1 и t_2 — времена стробирования, τ и E — постоянная времени релаксации и энергия ионизации примесного центра, A — постоянная, T — температура, k — постоянная Больцмана. Параметры E и A идентифицируют примесный центр в рамках рассматриваемой модели.

Получим выражение для относительной полуширины спектральной линии $\Delta T/T$ (T — температура, при которой достигается максимум линии, ΔT — ширина линии на половине ее высоты). Примем следующие допущения: 1) температура

слабо меняется в пределах линии, т. е. $\Delta T/T$ мало; 2) зависимость $\ln \tau(T)$ является плавной функцией обратной температуры в пределах линии. Правомочность указанных допущений вытекает из того, что: 1) согласно многочисленным публикациям, $\Delta T/T$ в спектрах РСГУ при использовании стандартных алгоритмов обработки составляет 0.1; 2) зависимость $\ln \tau$ от $(1/T)$ близка к прямо пропорциональной. Логарифмируя, затем дифференцируя выражение (2), получим

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta(\ln \tau)}{(2 + E/kT)}, \quad (3)$$

где $\Delta(\ln \tau)$ — ширина линии, записанной в координатах $S - \ln \tau$.

Отметим, что полученное выражение справедливо для любого алгоритма обработки релаксационного сигнала в РСГУ, поскольку при его выводе мы опирались лишь на выражение (2). Выбор конкретного алгоритма (весовой функции) определяет величину $\Delta(\ln \tau)$ и тем самым

влияет на разрешение метода. В таблице приведены значения величины $\Delta(\ln \tau)$, рассчитанные нами для варианта РСГУ с использованием двухканального строб-интегратора. Данные получены путем численного решения уравнения (1). Анализ выражения (3) и данных, приведенных в таблице, позволяет сделать следующие выводы: 1) для достижения минимальной ширины линий в спектре необходимо уменьшать отношение t_2/t_1 , что согласуется с выводами работы [4]; 2) дальнейшее уменьшение ширины линии (при $t_2/t_1 = \text{const}$) возможно путем пропорционального увеличения t_1 и t_2 . Известно, что регистрация спектра при больших временах стробирования вызывает смещение линий в область более низких температур, что в соответствии с (3) и приводит к уменьшению $\Delta T/T$. Отметим, что пропорциональное увеличение времен стробирования при $t_2/t_1 = \text{const}$ не влияет на величину $\Delta(\ln \tau)$.

На рис. 1 вместе с экспериментальными данными (а) приведены результаты расчета относительной полуширины линии $\text{Cu}_5^{-/2-}$ в германии: по выражению (3) (б) и путем численного решения уравнений (1) и (2) (в). Значения энергии ионизации примеси $E = 0.32$ эВ и постоянной $A = 8 \cdot 10^8 \text{ K}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, необходимые для проведения расчетов, определены из данных эксперимента. Сравнение расчетных зависимостей позволяет оценить погрешность допущений, принятых нами

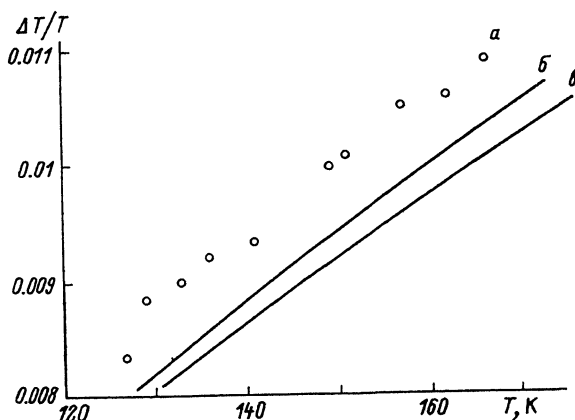


Рис. 1. Зависимость относительной полуширины линии $\text{Cu}_5^{-/2-}$ в германии от температуры, при которой регистрируется максимум линии.

а — экспериментальные данные; б — расчет по выражению (3); в — численное решение уравнений (1) и (2).

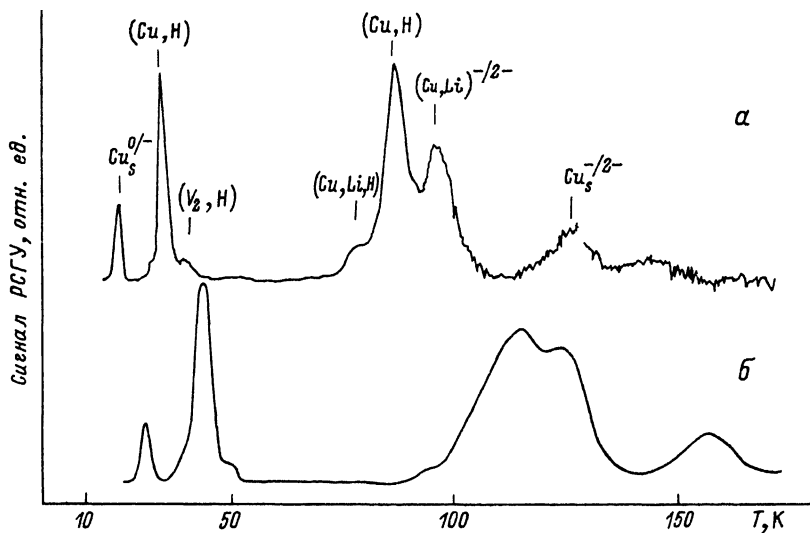


Рис. 2. Спектр глубоких уровней в p -Ge ($p = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при $T = 77 \text{ К}$).

$a - t_1 = 200, t_2 = 400 \text{ мс}$, время накопления 10 с; $b - t_1 = 0.2, t_2 = 0.4 \text{ мс}$, время накопления 1 с. Линия $(\text{Cu}, \text{Li})^{-2-}$ идентифицирована согласно [6], идентификация остальных линий соответствует [7].

при выводе выражения (3): она не превышает 2.5%, что говорит о справедливости сделанных допущений.

2. Для измерений были выбраны образцы монокристаллического p -Ge с концентрацией свободных дырок $p = 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при $T = 77 \text{ К}$. Относительная концентрация глубоких примесей в исследованных образцах не превышала 0.1 и определялась остаточными примесями: медью и ее комплексами с водородом и литием. Подготовка образцов к измерениям включала в себя шлифовку и полировку поверхности с последующим травлением образцов в смеси азотной и фтористоводородной кислот $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 4 : 1$. Контакт Шоттки формировался на противоположной грани образца путем втирания индий-галлиевой эвтектики.

Используемый спектрометр описан в [5]. В спектрометре реализован алгоритм обработки релаксационных сигналов с использованием двухканального стробинтегратора. Отношение времен стробирования фиксировано и составляет величину $t_2/t_1 = 2$; $(\Delta C/C)_{\min} = 10^{-5}$.

Нами исследована зависимость относительной полуширины $(\Delta T/T)$ от температуры для линий $\text{Cu}_s^{0/-}$ и Cu_s^{-2-} . Одна из зависимостей, как уже указывалось, приведена на рис. 1 вместе с расчетными. Изменение температуры T , при которой регистрируется максимум линии, достигалось изменением времен стробирования от $t_1 = 0.2, t_2 = 0.4 \text{ мс}$ до $t_1 = 200, t_2 = 400 \text{ мс}$. Отметим хорошее соответствие результатов эксперимента расчетным, что подтверждает возможность повышения разрешения в спектре при переходе к большим временам стробирования.

На рис. 2 показано, как меняется при этом спектр глубоких уровней в p -Ge. Видно, что наряду со смещением спектральных линий в область более низких температур происходит их обужение. При увеличении времен стробирования в 10^3 раз от $t_1 = 0.2, t_2 = 0.4 \text{ мс}$ до $t_1 = 200, t_2 = 400 \text{ мс}$ относительная полуширина линий в спектре уменьшилась на 15%, что позволило уверенно разрешить близлежащие линии в спектре: (Cu, H) и $(\text{Cu}, \text{Li})^{-2-}$. Снижение отношения «сигнал/шум» в спектре при переходе к большим временам стробирования объясняется уменьшением числа накоплений за время интегрирования.

В заключение, отвлекаясь от особенностей РСГУ с двухканальным строением интегратором, отметим, что разрешение в спектре РСГУ возрастает одновременно со смещением спектра в область более низких температур. Последнее часто может быть достигнуто регистрацией и обработкой «хвостовой» части кривой перезарядки глубокого центра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [2] Crowell C. R., Alipranchi S. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. N 1. P. 25—36.
- [3] Чихрай Е. В., Абдуллин Х. А. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 4. С. 751—753.
- [4] Balasubramanyam N., Kumar V. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 11. P. 6311—6314.
- [5] Варначев А. И., Гордеев Д. М., Ильина О. С., Маров Е. Ю., Шмагин В. Б. // Высококачественные вещества. 1991. № 5. С. 196—200.
- [6] Котина И. М., Курятков В. В., Новиков С. Р., Прокофьева Т. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 12. С. 2165—2168.
- [7] Simoen E. // Acad. Analecta. 1987. V. 49. N 4. P. 135—165.

Институт химии высококачественных веществ РАН
Нижний Новгород

Получено 12.11.1991
Принято к печати 26.12.1991

ФТП, том 25, вып. 5, 1992

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ПОЛОСЫ ИЗЛУЧЕНИЯ (1.23—1.25) ЭВ В СПЕКТРЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ GaAs<Te>

Джумамухамбетов Н. Г., Дмитриев А. Г.

1. Известно [1, 2], что в GaAs<Te> наблюдается широкая полоса излучения с максимумом (1.23—1.25) эВ. Она появляется независимо от того, был ли материал выращен из расплава, газовой фазы либо получен жидкостной эпитаксией. С увеличением концентрации примеси вплоть до 10^{18} см⁻³ интенсивность этого излучения растет по сравнению с краевой люминесценцией. Одними авторами полоса излучения (1.23—1.25) эВ связывается с комплексами галлия типа $V_{Ga} + 3Te$ либо $V_{Ga}Te_{As}$ [1]. Другими предполагается, что излучательный центр включает в себя комплекс мышьяка типа $V_{As} - V_{As}$ [2]. Такие комплексы возникают вследствие образования в GaAs твердых растворов при высоком уровне легирования.

В настоящей работе приводятся дополнительные аргументы, опровергающие гипотезу об определяющей роли V_{As} в образовании полосы излучения (1.23—1.25) эВ. Эти аргументы получены в результате изучения интенсивности излучения люминесценции при целенаправленном изменении концентрации вакансий мышьяка в GaAs при лазерном облучении.

2. В работе изучалась фотолюминесценция при 77 К. Использовались кристаллы GaAs<Te> с концентрацией электронов $(3 \div 6) \cdot 10^{17}$ см⁻³. При комнатной температуре кристаллы подвергались воздействию серии импульсов длительностью 10^{-3} с с длиной волны 1.06 мкм. Энергия лазерного импульса изменялась ступенчато. Режим облучения кристаллов отличался тем, что суммарная плотность энергии изменялась на 4 Дж/см². Для сравнения изучались спектры фотолюминесценции исходных и модифицированных кристаллов.

В спектрах люминесценции исходных кристаллов при 77 К наблюдались две характерные полосы излучения $h\nu_A \approx 1.507$ и $h\nu_B \approx 1.237$ эВ (см. рисунок). Полоса $h\nu_A$ (краевая полоса) связана с переходами неравновесных носителей с мелких донорных уровней кремния в валентную зону [3].