

довлен прямым взаимодействием РД с центрами люминесценции. Определенную (а в ряде случаев и доминирующую) роль в наблюдаемых зависимостях hw_m (Φ) могли играть изменения hw_m с интенсивностью возбуждения, налагавшиеся на соответствующие, обусловленные прямым взаимодействием РД с центрами люминесценции.⁴ Приведенные соображения важны для идентификации широко изучаемых физических процессов, приводящих к изменению электрофизических свойств элементарных и сложных полупроводников при радиационном воздействии (см., например, [12]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. W. Arnold. Phys. Rev., **183**, 777 (1969).
- [2] R. A. Polimadei, S. Share, A. S. Epstein. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-21, 96 (1974).
- [3] S. Share, A. S. Epstein, R. A. Polimadei. Sol. St. Electron., **18**, 471 (1975).
- [4] A. S. Epstein, S. Share, R. A. Polimadei, A. H. Herzog. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-23, 1654 (1976).
- [5] Н. И. Ярмолюк, В. Н. Вигдорович, Н. Г. Колин. ФТП, **14**, 1311 (1980).
- [6] К. Д. Глинчук, В. И. Гурошев, А. В. Прохорович. ФТП, **19**, 1326 (1985).
- [7] К. Д. Глинчук, В. И. Гурошев, А. В. Прохорович. ФТП, **20**, 567 (1986).
- [8] Ф. П. Коршунов, С. И. Радауцан, Н. А. Соболев. ФТП, **23**, 1581 (1989).
- [9] К. Д. Глинчук, В. И. Гурошев, А. В. Прохорович. ФТП, **20**, 1874 (1986).
- [10] К. Д. Глинчук, В. И. Гурошев, А. В. Прохорович. ФТП, **25**, 82 (1991).
- [11] M. C. de Long, P. C. Taylor. Appl. Phys. Lett., **57**, 620 (1990).
- [12] В. В. Емцев, Т. В. Машовец. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М. (1981).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 5, 1993

РЕЗОНАНСЫ В ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЛЕГИРОВАННОГО КРЕМНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВОЗБУЖДЕННЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ПРИМЕСИ

А. Г. Ждан, Е. М. Лифшиц, В. В. Рыльков, А. Г. Шафран

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук, 141120, Фрязино, Россия
(Получено 7 декабря 1992 г. Принято к печати 10 декабря 1992 г.)

Исследовались температурные зависимости электропроводности образцов p -Si, легированных галлием до концентраций $N_{Ga} = 5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов с контактами, изготовленными имплантацией бора с последующим нанесением Au или Al.

Эксперименты проводились следующим образом: исследуемый образец помещался в рабочую камеру измерительной ячейки [1] на медный держатель с укрепленными внутри него нагревателем и термометром. После охлаждения до температуры $T = 4.2 \text{ К}$ образец облучался PbSnSe-лазером с энергией фотонов 250 мэВ. Затем лазер выключался, и измерялся ток I через образец в динамическом режиме изменения температуры по линейному закону со скоростью от 0.42±

⁴ Для изученных в [6–7] полос примесного излучения при используемых L положение максимума люминесценции hw_m не зависело от интенсивности возбуждения L . Это свидетельствует о том, что наблюдаемый в [6–7] радиационно-стимулированный сдвиг величины hw_m полностью обусловлен прямым взаимодействием РД с центрами люминесценции — комплексами $V_{Ga}Te_{As}$ и $Cr_{Ga}Te_{As}$, а именно с ассоциацией последними РД.

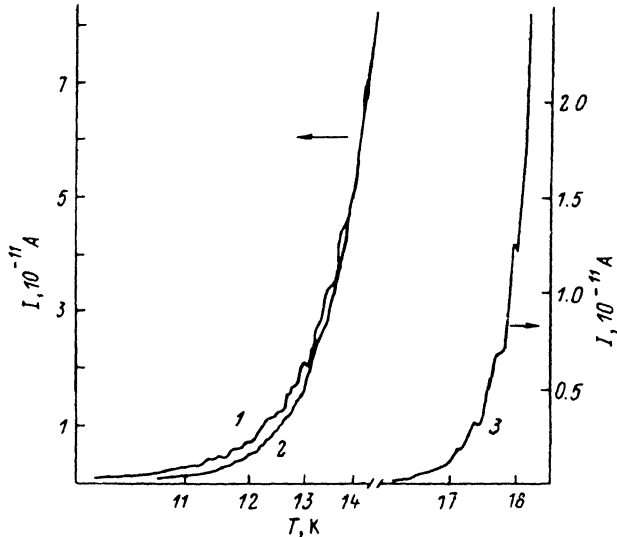


Рис. 1. Температурные зависимости тока через образец при линейном законе изменения температуры со скоростью 0.58 ± 0.01 К/с: 1, 2 — в образце с $N_{Ga} = 5.7 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ после предварительного облучения и без него соответственно; 3 — в образце с $N_{Ga} = 5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $N_B > N_{comp}$, после предварительного облучения.

± 0.01 до 0.58 ± 0.01 К/с. Далее образец отогревался до $T \approx 25$ К, при которой уже заметна проводимость по основной зоне, затем вновь охлаждался до $T = 4.2$ К, и повторялись температурные измерения в тех же условиях, но без предварительного облучения. Правильность измерения температуры образцов в динамическом режиме проверялась по сопоставлению температурной зависимости фототока при постоянной подсветке в стационарном и динамическом режимах.

На рис. 1 приведены для одного из образцов оба типа температурных зависимостей тока (кривые 1, 2). Видно, что кривая 1, измеренная в предварительно облученном образце, в отличие от кривой 2 немонотонна. Особенности кривой 1 четко проявляются в виде резонансов на разностной кривой (рис. 2). Аналогичная картина наблюдалась на других образцах.

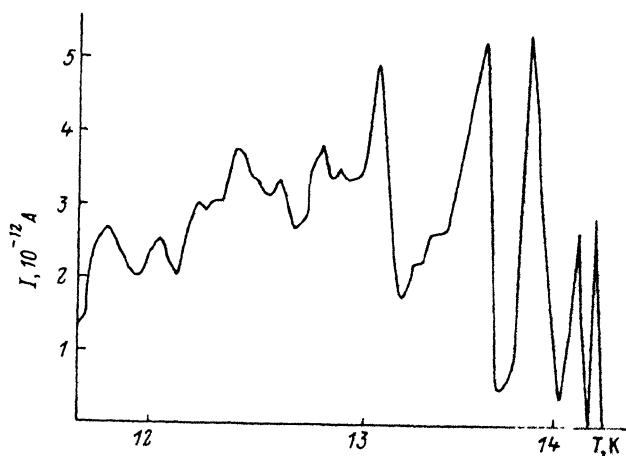


Рис. 2. Разность кривых 1, 2, приведенных на рис. 1.

При анализе результатов измерений будем исходить из представлений, принятых в теории термостимулированной проводимости (ТСП) полупроводников [2], согласно которой для определения энергетического положения уровней, отвечающих пикам ТСП, необходимо провести измерения при двух различных скоростях нагрева. Энергия уровня E выражается через положение пиков T_1 и T_2 при двух скоростях нагрева β_1 и β_2 в виде

$$E = k \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{\beta_2 T_1^2}{\beta_1 T_2^2},$$

где k — постоянная Больцмана.

Следует иметь в виду, что даже небольшая ошибка в определении температур T_1 , T_2 (± 0.01 К) может приводить к заметной относительной ошибке в определении энергий резонансов из-за того, что при малой разности $\Delta T = T_2 - T_1$ погрешность достигает $\pm 10\%$. Поскольку величина ΔT взята для всех резонансов одинаковой, относительная ошибка определения энергий является систематической. Вследствие этого разности энергий резонансов определяются со значительно меньшей абсолютной ошибкой, нежели сами энергии.

Обращает на себя внимание тот факт, что энергия, соответствующая высокотемпературному резонансу на зависимости $I(T)$, равная 46.9 мэВ, близка к энергии ионизации бора в кремнии. Несмотря на то, что образцы изготавливались из предельно очищенного (перед легированием) кремния, можно ожидать присутствия в них, помимо компенсирующих примесей, концентрация которых, определенная из холловских измерений, не превышала $N_{\text{comp}} = (2+4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, также и сопутствующих (т. е. того же типа, что и основная) примесей. Концентрацию последних, однако, если она меньше, чем концентрация компенсирующих примесей, из температурных зависимостей коэффициента Холла определить практически невозможно [3]. Исходя из этого, мы предположили, что наблюдаемые резонансы связаны с термическими переходами из основного в возбужденные состояния в атомах примеси бора. Механизм явления представляется следующим. При низкой температуре облучение кристалла приводит к нейтрализации атомов В за счет дырок, выбрасываемых излучением в валентную зону с примеси Ga. Неравновесное заполнение В при $T = 4.2$ К сохраняется длительное время. С ростом температуры начинается ионизация нейтральных атомов В. В этом процессе возбужденные состояния играют роль резонансов, четко проявляющихся при температурах, отвечающих достаточно большой вероятности выброса дырок из возбужденного в свободную зону.

Для подтверждения сказанного был измерен образец Si : Ga с концентрацией бора $N_B > N_{\text{comp}}$ (об этом свидетельствовал участок температурной зависимости электропроводности с энергией активации бора). В этом образце резонансы отвечают тем же энергиям, что и в образце, описанном выше, и проявляются даже ярче (рис. 1, кривая 3).

Интересно сопоставить энергии наблюдаемых резонансов с энергиями возбужденных состояний В в Si. Обычно для исключения возможных ошибок, связанных с неточным значением энергий ионизации примеси, при таких сопоставлениях используют разности энергий между произвольно выбранным возбужденным состоянием, энергия связи которого хорошо известна, и другими состояниями. Нашей целью было выяснить, возможно ли приписать самому высокотемпературному резонансу такой возбужденный уровень, чтобы разность энергий между ним и другими резонансами соответствовала таковой в атомах бора в кремнии, найденным из оптических измерений [4, 5]. Оказалось, что хорошее соответствие получается, если высокотемпературный резонанс связать с переходом из основного состояния $1\Gamma_6^+$ в состояние $2\Gamma_6^-$ (линия 6В). Соответствующие данные приведены в таблице.

Спектральные линии*	Разности энергий, мэВ	
	данные [4,5]	наши данные
6В—5	0.59	0.6
6В—4	2.47	2.5
6В—3	3.71	4.0
6В—2	7.57	7.5

Примечание. * Нумерация по [4].

Наблюдаемое явление подобно фототермической ионизации примесей [6] с той разницей, что в данном случае обе последовательные ступени — возбуждение и ионизация примесей — происходят за счет термических переходов. С его помощью оказывается возможным обнаружение и идентификация химической природы сопутствующих примесей на фоне основной легирующей, концентрация которой превышает концентрацию сопутствующих на

несколько порядков. Обработка данных измерений температурных зависимостей тока через образец в динамическом режиме изменения температуры с разными скоростями нагрева позволяет оценить время жизни носителей заряда в возбужденных состояниях. Можно также ожидать проявления в виде резонансов на кривой $I(T)$ возбужденных уровней, не наблюдаемых при фототермической ионизации из-за запрета соответствующих оптических переходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. Г. Ждан, И. И. Засавицкий, Т. М. Лифшиц, В. В. Рыльков, А. П. Шотов. ПТЭ, № 6, 177 (1985).
- [2] Ю. А. Гороховатский, Г. А. Бордовский. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М. (1991).
- [3] А. С. Веденеев, Г. И. Воронкова, А. Г. Ждан, Ш. М. Коган, Т. М. Лифшиц, В. В. Рыльков. ФТП, 22, 586 (1988).
- [4] D. W. Fisher, I. I. Rome. Phys. Rev. B, 27, 4826 (1983).
- [5] M. L. W. Thewalt. Sol. St. Commun., 23, 733 (1977).
- [6] Sh. M. Kogan, T. M. Lifshits. Phys. St. Sol. (a), 39, 11 (1977).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 5, 1993

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО СЕЛЕНА

А. А. Чеснис

Институт физики полупроводников Академии наук Литвы,
232600, Вильнюс, Литва
(Получено 12 августа 1992 г. Принято к печати 14 декабря 1992)

Отрицательное дифференциальное сопротивление (ОДС) в тонких пленках аморфного селена, согласно результатам исследования электрических шумов [1, 2], обусловлено электронными процессами, главным из которых предполагается процесс ударной ионизации. Информация в [1, 2], однако, недостаточна, чтобы создать представление о механизме возникновения ОДС в данном случае. Выяснению этого вопроса могут способствовать дополнительные данные, полученные при сопоставлении результатов исследования электропроводности пленок в предпробойных полях с результатами упомянутых шумовых исследований. Наиболее важные из них рассмотрим в данной публикации.