

©1994 г.

РЕЛАКСАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ GaAs

И.В.Островский, С.В.Сайко, Р.К.Савкина

Киевский университет, Киев, Украина

(Получена 3 августа 1993 г. Принята к печати 7 декабря 1993 г.)

Исследованы амплитудные зависимости релаксационных характеристик акустоэлектрического напряжения в эпитаксиальных полупроводниковых структурах GaAs. Спадающий участок сигнала акустоэдс интерполирован суммой трех экспонент, соответствующих различным типам ловушек на границе раздела эпитаксиального слоя и подложки. При увеличении мощности возбуждающего радиочастотного импульса сильно возрастает вклад в поперечное акустоэлектрическое напряжение глубоко лежащих центров захвата. Это приводит к увеличению времени релаксации сигнала акустоэдс. По релаксационным характеристикам можно определить параметры глубоких центров захвата на границе раздела эпитаксиальный слой-подложка.

К настоящему времени для исследования дефектов в полупроводниках разработано большое количество экспериментальных методик, типа фотопроводимости, $C-V$ -измерений, поперечного акустоэлектрического эффекта и др. [1-3]. Особенно широкое распространение получили нестационарные варианты этих методик, таких как DLTS [4], в которых применяется импульсное возбуждение полупроводников и изучаются последующие процессы релаксации.

В данной работе проведен анализ релаксирующего участка поперечного акустоэлектрического напряжения (ПАН) при различных амплитудах поверхностных акустических волн (ПАВ) в эпитаксиальной структуре GaAs. Нелинейное акустоэлектрическое взаимодействие между ПАВ и свободными носителями заряда в полупроводниках было широко изучено [5,6], однако ПАН после выключения ультразвука обычно не исследовался. Поскольку материал арсенид галлия является пьезоэлектрическим, возможно возбуждение элеткрически активных ПАВ непосредственно в исследуемой структуре, показанной на рис. 1, где ПАВ генерируется при приложении радиочастотного электрического поля к встречно-штырьевому преобразователю. Генерированные акустические волны распространяются по поверхности образца, состоящего из эпитаксиального слоя n -GaAs, толщиной 8 мкм, нане-

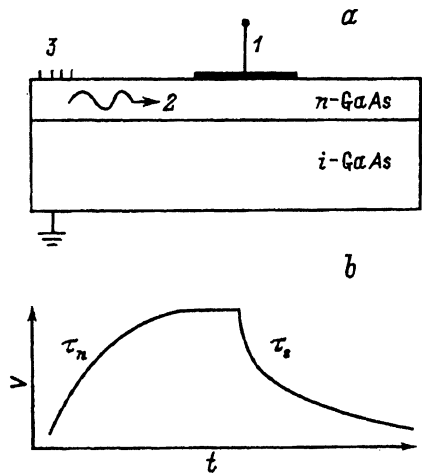


Рис. 1. Полупроводниковая структура, используемая для экспериментов (а), и форма импульса ПАН (б).

1 — ПАН, 2 — ПАВ, 3 — встречно-штырьевой преобразователь.

сенного на полуизолирующую подложку i -GaAs. Сигнал ПАН снимался с металлического контакта, нанесенного на эпитаксиальный слой.

В результате взаимодействия электрических полей ПАВ со свободными носителями заряда в полупроводнике изменяется эффективная концентрация электронов и дырок у границы раздела эпитаксиального слоя и подложки, что приводит к изменению в заполнении ловушечных уровней и возникновению «ловушечного» акустоэлектрического эффекта [7]. На рис. 1 показана типичная форма сигнала ПАН. Время нарастания τ_n и спада τ_s ПАН могут достигать десятков мс, тогда как время, связанное с выходом радиочастотного сигнала из-под полупроводника, не превышает 5 мкс. Для «концентрационного» акустоэлектрического эффекта максвелловское время релаксации ($\tau_m = \epsilon\epsilon_0/\sigma$) зависит от проводимости полупроводника σ и в нашем случае равнялось 2 мкс. Таким образом, участки плавного возрастания и спада сигнала ПАН с характеристическими временами $10^2 - 10^4$ мкс непосредственно связаны с процессами зарядки и разрядки центров захвата.

Особенность арсенида галлия по сравнению с такими полупроводниками, как Si и Ge заключается в том, что в его состав входят атомы двух сортов. В результате этого увеличивается число различных нарушений кристаллической решетки. Например, возможны четыре ситуации при размещении атомов галлия и мышьяка в междоузлии решетки. Атомы ряда элементов, таких как кислород, хром и др., растворяясь в арсениде галлия в процессе выращивания образуют в запрещенной зоне глубоколежащие донорные и акцепторные уровни. Эти уровни являются ловушками для электронов и дырок и центрами рекомбинации. Существенное влияние на свойства арсенида галлия оказывают комплексы, образованные в результате взаимодействия примесей между собой, либо примеси с вакансией. Все это объясняет наличие большого количества разнообразных типов ловушек и их сильное влияние на свойства полупроводниковых структур на основе арсенида галлия.

Особенно много дефектов структуры наблюдается на поверхности. При этом необходимо отметить, что в данном случае термин «поверхность» применим как к самой поверхности полубесконечного образца, так и к границе раздела эпитаксиального слоя с подложкой в случае

слоистых структур. Для структуры с одним эпитаксиальным слоем, как правило, граница раздела является определяющей для формирования ПАН [8], поскольку в этой области сосредоточено максимальное число дефектров из-за несоответствия кристаллических решеток эпитаксиального слоя и подложки.

Каждый i -й тип ловушек характеризуется определенным временем релаксации τ_i . Тогда при наличии на поверхности n -типов ловушек спадающий участок ПАН можно интерполировать суммой n экспонент:

$$V(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-t/\tau_i), \quad (1)$$

где A_i — вклад i -го центра захвата в ПАН. При большой концентрации ловушек одного типа энергетический уровень залегания E_{ti} может расщепиться в подзону [9]. Однако и в этом случае релаксация ПАН для этого центра будет иметь экспоненциальный характер [10] с временем релаксации

$$\tau_i = \frac{\int N_{ssi}(E) f_i(E) [1 - f_i(E)] dE}{n_s W_i \int N_{ssi}(E) [1 - f_i(E)] dE}, \quad (2)$$

где $N_{ssi}(E)$ — энергетическая плотность состояний в подзоне, f_i — равновесная функция распределения для зарядов на ловушках, n_s — концентрация свободных носителей у поверхности полупроводника, W_i — вероятность захвата заряда на ловушку, пропорциональная тепловой скорости носителей V_t и сечению захвата S_i ($W_i = S_i v_t$).

Если же расщепления нет или оно слабое, то выражение (2) для времени релаксации электронных ловушек переходит в хорошо известное

$$\tau_i = \frac{1}{N_c v_t S_i} \exp(E_{ti}/kT), \quad (3)$$

где N_c — плотность состояний у дна зоны проводимости.

Как отмечалось выше, для GaAs характерно присутствие большого количества дефектов, которые образуют ловушечные уровни. Однако не все они могут принимать участие в формировании ПАН. Так, электронная ловушка $EL2$, которая обычно всегда присутствует в GaAs, имеет в основной конфигурации энергию залегания $E_t = 0.73$ эВ и сечение захвата $S_n \sim 10^{-15}$ см² при комнатной температуре [11]. При этом время релаксации, вычисленное по формуле (3), составляет 30 мин. Таким образом, при использовании коротких радиочастотных импульсов (в нашем случае до 100 мс) эта ловушка не успевает проявиться в импульсе ПАН.

Известно, что для полупроводниковых структур GaAs, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, преобладающими являются электронные ловушки $EL4$, $EL7$, $EL10$ [12], а также дырочные $HL7$, $HL8$ [13]. Однако из-за малой концентрации дырок в электронном полупроводнике, как правило, основной вклад в ПАН дают электронные центры захвата. В нашем случае наблюдался положительный сигнал акустоэдс, что соответствует захвату электронов ловушками под воздействием ПАВ. На рис. 2 показана форма спадающего участка ПАН

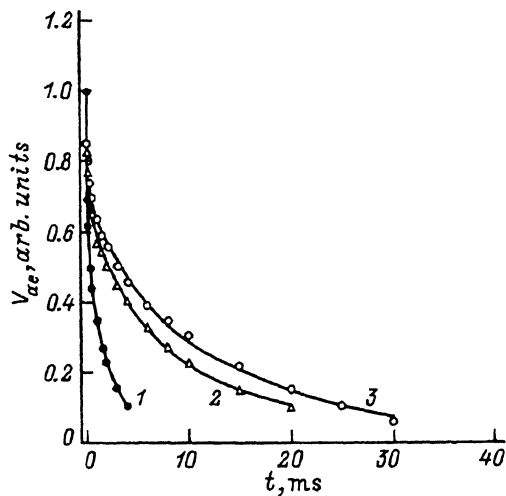


Рис. 2. Форма спадающего участка ПАН при различных амплитудах возбуждающего радиочастотного импульса V_{pp} , В:

1 — 0.24, 2 — 0.50, 3 — 1.0. Точки — эксперимент, линии — теоретический расчет по формуле (1) с A_i , приведенными на рис. 3.

при различных амплитудах возбуждающего радиочастотного импульса V_{pp} . Для удобства анализа амплитуды сигналов приведены к единице. Видим, что с возрастанием мощности ПАВ общее время релаксации ПАН увеличивается. Этот эффект можно объяснить тем, что сначала заполняются ловушки с мелкими уровнями залегания и соответственно быстрыми временами релаксации, а медленные ловушки не успевают захватывать электроны. Поэтому при небольших амплитудах ультразвука глубокие центры захвата почти не принимают участие в формировании ПАН. Однако с увеличением мощности возбуждающего сигнала их роль непрерывно возрастает, что и приводит к увеличению времени релаксации для импульса ПАН.

Спадающий участок сигнала акустоэдс был интерполирован в виде выражения (1) с помощью специальной программы, минимизирующей ошибки. Величины τ_i и A_i выступали в качестве искомых параметров. Оказывалось, что релаксация ПАН хорошо описывается тремя

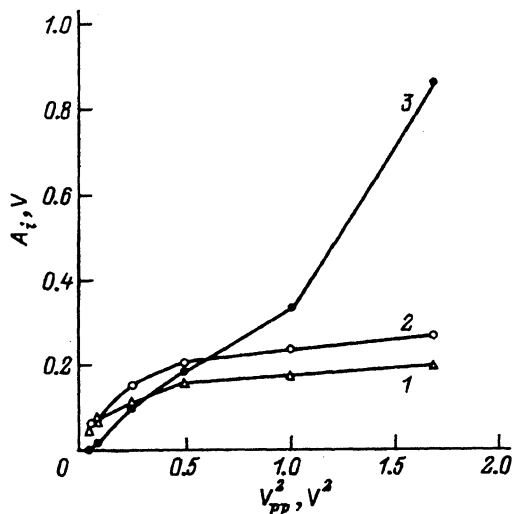


Рис. 3. Абсолютный вклад в общий сигнал ПАН составляющих A_i с различными временами релаксации τ_i , мс: 1 — 0.17, 2 — 4.5, 3 — 22.

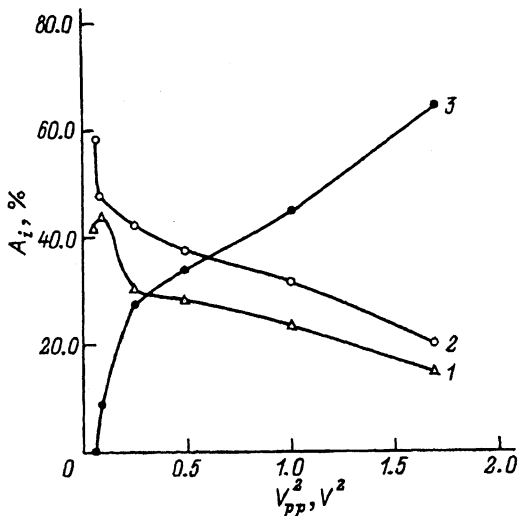


Рис. 4. Относительный вклад в общий сигнал ПАН составляющих A_i с различными временами релаксации τ_i , мс: 1 — 0.17, 2 — 4.5, 3 — 22.

экспонентами с различными временами релаксации — $\tau_1 = 0.17$ мс, $\tau_2 = 4.5$ мс и $\tau_3 = 22$ мс. Соответствующие им амплитуды A_i зависят от мощности ПАВ и были всегда положительны. Это говорит о наличии на границе раздела эпислой и подложки нескольких типов электронных ловушек, число которых может быть и больше трех, поскольку разные центры захвата могут иметь близкие времена релаксации. Абсолютный вклад каждого типа ловушек в ПАН с возрастанием мощности ПАВ, естественно, увеличивается (рис. 3). Однако для относительно медленных (более глубоких) центров это нарастание значительно сильнее, чем для относительно быстрых (более мелких). Поэтому относительный вклад экспоненциальной составляющей с $\tau_3 = 22$ мс возрастает с увеличением V_{pp} , а относительный вклад составляющих для быстрых ловушек $\tau_1 = 0.17$ мс и $\tau_2 = 4.5$ мс уменьшается (рис. 4), что и приводит к увеличению времени релаксации сигнала в целом.

Необходимо отметить, что соотношение вкладов различных типов центров захвата в амплитуду ПАН зависит от многих параметров, в том числе и от количества этих центров. Следовательно, возможно определение концентраций дефектов, образующих поверхностные уровни, на границе раздела в эпитаксиальных полупроводниковых структурах методом нестационарного акустоэлектрического напряжения. Для точного количественного нахождения этих значений необходимы дополнительные исследования, выходящие за рамки данной работы.

Таким образом, показано, что анализируя релаксирующее ПАН, можно определить времена релаксации и количество основных типов дефектов на поверхности раздела в структурах с эпитаксиальными слоями. Комбинируя эти измерения с другими, можно оценить концентрацию этих типов дефектов.

Список литературы

- [1] Р. Бьюб. Фотопроводимость твердых тел. М.: Иностран. лит. (1962).
- [2] A. Cola, M.G. Lupo, L. Vasanelli, A. Valentini. Sol. St. Electron., **36**, 785 (1993).
- [3] A. Abbate, K.J. Han, I.V. Ostrowskii, P. Das. Sol. St. Electron., **36**, 697 (1993).

- [4] A. Chantre, G. Vinsent, D. Bios. Phys. Rev. B, **23**, 5335 (1981).
- [5] F. Palma. J. Appl. Phys., **52**, 6749 (1989).
- [6] M. Benabdeslem, I. Ostrowskii. Rev. Phys. Appl., **25**, 1005 (1990).
- [7] Ю.В. Гуляев, А.М. Кмита, А.В. Медведь, В.П. Плесский, Н.Н. Шибанов, В.Н. Федорец. ФТТ, **17**, 3505 (1975).
- [8] K.J. Nan. Electrical Characterization of Semiconductors Using Surface Acoustic Wave, 200. Ph.D.thesis (1992).
- [9] А.В. Ржанов. ФТП, **6**, 1495 (1972).
- [10] И.В. Островский, С.В. Сайко. ФТТ, **35**, 1043 (1993).
- [11] D. Geguenheim, M. Lannoo. XX Int. Conf. Phys. of Semicond., **1**, 453. Thessaloniki (1990).
- [12] G.M. Martin, A. Mitonneau, A. Mircea. Electron. Lett., **3**, 191 (1977).
- [13] A. Mitonneau, G.M. Martin, A. Mircea. Electron. Lett., **3**, 666 (1977).

Редактор В.В. Чалдышев
