

05; 08

© 1990

АВТОМОДУЛЯЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН И АВТОКОЛЕБАНИЯ
АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ
В СТРУКТУРЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК

В.А. Вьюн

Возможности различных нелинейных акустоэлектронных (АЭ) явлений, происходящих в слоистых структурах пьезоэлектрик-полупроводник и представляющих практический и научный интерес для исследователей, постоянно расширяются [1-4]. Недавно в таких структурах были обнаружены би- и мультистабильные АЭ явления в пассивной кольцевой резонаторной системе [5, 6], в гибридной системе с обратной связью, управляющей проходной способностью структуры [7], а также непосредственно в структуре без внешних обратных связей [5, 8-10]. В настоящей работе впервые сообщается о существовании автомодуляции поверхностных акустических волн (ПАВ) и автоколебании поперечного акустоэлектрического эффекта (ПАЭ) в структуре пьезоэлектрик-полупроводник.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Слоистая структура пьезоэлектрик ($LiNbO_3$ YZ-среза) - полупроводник ($n-Si$ с удельным сопротивлением 200 Ом.см) включена так, что в ней из 12 пар электродов) на центральной частоте 110 МГц при подаче на него прошедшего через амплитудный модулятор „М” высокочастотного сигнала (V_0, V, V_S - амплитуды сигналов на входе модулятора, на излучающем и приемном преобразователях соответственно). Сигнал ПАЭ, усиленный усилителем с коэффициентом усиления k , управляет амплитудой прошедшего через модулятор сигнала.

В эксперименте при малых амплитудах V_0 низкочастотный автоколебания отсутствуют и возникают начиная с некоторых значений V_0 . Осциллограммы сигналов ПАЭ на выходе усилителя V_B (сплошные линии) и амплитуды сигнала V (пунктирные линии) представлены на рис. 2. (На рис. 2 амплитуде сигнала V_0 соответствует значение V при t , когда $V_B=0$). При увеличении V_0 сначала возрастает амплитуда колебаний V_B и глубина модуляции V (рис. 2, а-в), а затем колебания из регулярных превращаются в стохастические. При увеличении коэффициента k (на 30 дБ на рис. 2, д) автоколебания возникают при меньших входных амплитудах V_0 . При подсветке полупроводникового образца частота колебаний возрастает (рис. 2, г).

Для объяснения полученных результатов учтем, что в исследуемой схеме (рис. 1) в стационарном случае из-за наличия раздели-

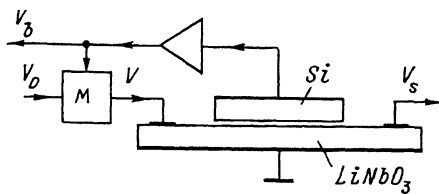


Рис. 1. Схема экспериментальной системы.

гельной емкости структуры C_S на усилителе с входным сопротивлением R и емкостью C сигналы на входе V_R и выходе V_S усилителя равны нулю. В динамике поперечная акустоэдс V_a (фактически это значение потенциала на поверхности полупроводника) и сигнал на электродах структуры (на входе усилителя) V_R связаны уравнением

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{C_0}{C_S} \left(\frac{dV_R}{dt} - \frac{V_R}{\tau_R} \right), \quad (1)$$

где $C_0 = C_S + C$, $\tau_R = RC_0$ - время релаксации цепи (в эксперименте $\tau_R = 0.2$ мс). Также учтем, что в типичной ситуации преобладания в ПАЭ ловушечной компоненты над концентрационной [11, 12] V_a с хорошей точностью аппроксимируется уравнением [13-15]:

$$\tau_a \frac{dV_a}{dt} + V_a = V_{a0}, \quad (2)$$

где τ_a - время релаксации ПАЭ, которое в общем случае зависит от V_a ; $V_{a0} = F_a(k_S V_0 F_m(k V_R))$ - квазистационарное значение ПАЭ, являющееся некоторой функцией F_a амплитуды ПАВ $A = k_S V$ и при малых амплитудах, например, пропорциональное A^2 из-за квадратичной нелинейности в структуре [12]; коэффициент k_S характеризует эффективность возбуждения ПАВ при подаче на преобразователь напряжения $V = V_0 F_m(k V_R)$; F_m - пропускная способность модулятора ($F_m = 1$ при $V_R = 0$). Отметим, что возможность описания динамики ПАЭ уравнением (2) следует из кинетики захвата неравновесных носителей заряда на поверхностные состояния полупроводника [3, 16, 17] и непосредственно проверяется при включении/выключении сигналов ПАВ и регистрации ПАЭ усилителем с большим входным сопротивлением. Для исследуемой структуры значение τ_a в (2) хорошо аппроксимируется 40 мкс в темноте и 15 мкс при подсветке. При получении уравнений (1), (2) мы пренебрегли сопротивлением и емкостью полупроводника, а также считали, что период низкочастотных колебаний и τ_a много больше времени задержки ПАВ в структуре.

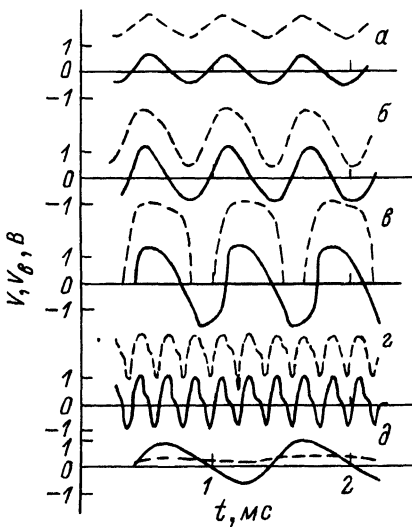


Рис. 2. Осциллограммы сигнала ПАЭ V_b (сплошные линии) и амплитуды высокочастотного сигнала V (пунктирные линии).

Уравнения (1), (2) преобразуются к дифференциальному уравнению второго порядка:

$$\frac{d^2 V_R}{dt^2} - Q(V_R) \frac{dV_R}{dt} + \Omega^2 V_R = 0, \quad (3)$$

где $\Omega = (\tau_\alpha \tau_R)^{-1/2}$, $Q(V_R) = \frac{1}{\tau_\alpha} \frac{C_S}{C_0} \frac{dV_{\alpha 0}}{dV_R} - \frac{1}{\tau_\alpha} - \frac{1}{\tau_R}$. Из (3) видно,

что при $Q(0) > 0$ возможны автоколебания в мягком режиме возбуждения на циклической частоте $\sim \Omega$. В эксперименте малые квазигармонические колебания хорошо описываются уравнением Ван-дер-Поля, когда в разложении $Q(V_R)$ в (3) достаточно ограничиться квадратичным членом [18]. Частота возникающих колебаний выражается через τ_α , τ_R , т.е. автоколебательный режим ПАЭ позволяет по измерению Ω определить значение τ_α и дополняет методы АЭ спектроскопии поверхности полупроводников [19]. Так, на рис. 2, г увеличение частоты связано с соответствующим уменьшением τ_α при подсветке.

В заключение отметим, что в схеме модулятор может быть выполнен в АЭ исполнении в одной структуре. При этом реализуется некоторый аналог распределенной обратной связи через ПАЭ. Оценки показывают, что в этом случае также возможен автоколебательный режим ПАЭ, автомодуляция ПАВ и гибридная АЭ бистабильность при эффективной АЭ модуляции [20]. Также отметим, что

в случае фотоэдс, обладающей аналогичными ПАЭ релаксационными свойствами, возможны автоколебания фотоэдс в аналогичной схеме (без ПАВ) с управляемой от фотоэдс модуляцией подсветки полупроводника.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Гуляев Ю.В., Медведь А.В. // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 8. С. 911-948.
- [2] В а л а к и р е в М.К. In: Nonlinear Phenomena in Solid - Modern Topics, Singapore, 1985. P.191-232.
- [3] Гуляев Ю.В., Кмита А.М., Медведь А.В., Плесский В.П., Шибанова Н.Н., Федоренко В.Н. // ФТТ. 1975. Т. 17. № 12. С. 3505-3515.
- [4] Кайно Г.С. // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 5. С. 188-217.
- [5] Вьюн В.А., Гайнер А.В., Сурдутович Г.И., Яковкин И.Б. // ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 3. С. 583-587.
- [6] Вьюн В.А., Гайнер А.В., Сурдутович Г.И., Яковкин И.Б. // ЖТФ. 1987. Т. 57. № 6. С. 1189-1191.
- [7] Вьюн В.А., Яковкин И.Б. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 15. С. 941-944.
- [8] Вьюн В.А., Гайнер А.В., Сурдутович Г.И., Яковкин И.Б. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 13. С. 799-802.
- [9] Вьюн В.А., Яковкин И.Б. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 1. С. 230-232.
- [10] Вьюн В.А., Яковкин И.Б. // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 5. С. 840-842.
- [11] Гуляев Ю.В., Кмита А.М., Медведь А.В., Плесский В.П., Шибанова Н.Н., Федоренко В.Н. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21. № 6. С. 353-355.
- [12] Громашевский В.Л., Кундзич А.Г. // УФЖ. 1984. Т. 29. № 4. С. 561-564.
- [13] G i l b o a H., D a s P. // Surface Sci. 1977. V. 62. N 2. P. 536-550.
- [14] Вьюн В.А., Каплинский А.Е., Левин М.Д. // ФТТ. 1979. Т. 21. № 10. С. 3159-3161.
- [15] Бондаренко В.С., Громашевский В.Л., Кундзич А.Г., Миселюк Е.Г., Соболев Б.В., Шаров А.Ф. // ФТТ. 1980. Т. 22. № 5. С. 1566-1568.
- [16] Калашников С.Г., Федосов В.И. // ФТП. 1980. Т. 22. № 1. С. 70-74.
- [17] Ржанов А.В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М.: Наука. 1971. 480 с.

- [18] Бог олю б о в Н.Н., М и т р о п о л ь с к и й Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука. 1974. 411 с.
- [19] В ь ю н В.А., Р ж а н о в А.В., Я к о в к и н И.Б. Акустоэлектронные методы исследования поверхности полупроводников. Новосибирск: ИФП СО АН СССР. 1987. 126 с.
- [20] Г у л я е в Ю.В., М а н с ф е л ь д Г.Д., О р л о в а Г.А. // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 1. С. 2197-2202.

Институт физики полупроводников
СОАН СССР, Новосибирск

Поступило в Редакцию
31 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 5

12 марта 1990 г.

01; 05; 06

© 1990

ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЭЛЕКТРОНОВ В СТРУКТУРЕ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ

Ф.Л. С е р ж е н к о, В.Д. Ш а д р и н

Фотоприемники, принцип действия которых основан на фотоионизации квантовых ям (КЯ), по основным параметрам не уступают ИК-приемникам на межзонных переходах. В значительной мере это связано с тем, что коэффициент поглощения излучения на КЯ не мал и сравним с таковым на прямых межзонных переходах [1-3]. Другой важной величиной, определяющей фотоэлектрические характеристики фотоприемника, является время жизни фотовозбужденных электронов в зоне проводимости. В слоистых структурах с КЯ на основе полярных полупроводников время жизни определяется процессами захвата электронов в ямы при испускании ими полярных оптических фотонов. В настоящем сообщении вычислена вероятность такого захвата и рассмотрены фотоэлектрические характеристики фоторезистора на КЯ.

Исходя из выражения для гамильтониана электрон-фононного взаимодействия

$$\hat{\mathcal{H}} = \sum_{\vec{q}} c(\vec{q}) \exp(i\vec{q}\vec{r}^+) (\hat{a}_{\vec{q}}^+ + \hat{a}_{\vec{q}}),$$

где \vec{q} - волновой вектор фонона, $\hat{a}_{\vec{q}}^+$ и $\hat{a}_{\vec{q}}$ - операторы рождения и уничтожения фононов, получим следующее выражение для вероятности захвата в единицу времени в одну яму: