

5. Для получения универсальной модели (5), (7) нужно использовать или совместные с наземными, или только наземные наблюдения, причем вид и коэффициенты модели сильно зависят от того, к какой сглаженной земной поверхности отнесены наземные наблюдения (т. е. нельзя увеличивать детальность представления поля притяжения только путем увеличения количества членов представления).

6. Среди всех представлений типа (5), (7) для каждой области наблюдений существует последовательность сумм наилучшего приближения (среднеквадратичного и равномерного), определяемая выбором параметров c и a . Очевидно, их можно найти только из обработки наблюдений, и они дают наилучшее приближение только в области наблюдения.

Заметим также, что можно отказаться от поисков наилучшего представления V среди рядов по шаровым функциям. Так, например, полученное нами разложение потенциала эллипсоида произвольного сжатия в ряд по гипергеометрическим функциям (вместо $1/r^n$) [6] оказывается не только сходящимся там, где ряд Лапласа расходится, но и более быстро сходящимся в некоторой части области, где сходится и ряд Лапласа. Если разложить гипергеометрические функции в степенные ряды и представить полученный в [6] ряд в виде предела сумм шаровых функций, то окажется, что мы получим представление типа (5); c и a при этом определяются сжатием эллипсоида.

Конечно, если определить базисную систему функций, ортогональных по области наблюдений, и по ней вести разложение, то задачу наилучшего представления V можно решить единственным образом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Чуйкова Н. А. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1983, 25, № 1, с. 22.
[2] Мориз Г. Современная физическая геодезия. М.: Недра, 1983. [3] Маркушевич А. И. Теория аналитических функций. Т. 2. М.: Наука, 1968. [4] Маркушевич А. И. Избранные главы теории аналитических функций. М.: Наука, 1976.
[5] Антонов В. А., Холшевников К. В. Астрон. журн., 1982, 59, № 4, с. 763.
[6] Чуйкова Н. А. В кн.: Изучение Земли как планеты методами астрономии, геодезии и геофизики. Киев: Наукова думка, 1982.

Поступила в редакцию
10.10.84

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, Т. 26, № 5

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 534.222

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА АКУСТОЭЛЕКТРОННОЕ ЗАПОМИНАНИЕ В СТРУКТУРЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК—ПОЛУПРОВОДНИК

И. Ю. Солодов, Г. Ю. Тимофеева

(кафедра акустики)

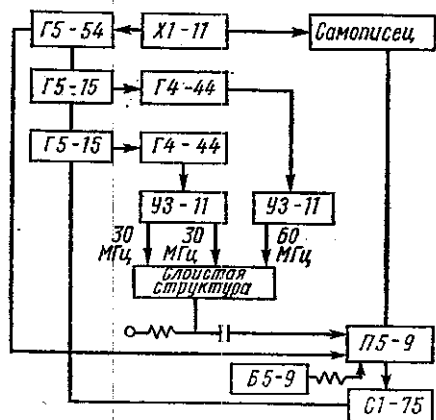
Акустоэлектронное последствие в слоистой структуре пьезоэлектрик—полупроводник интенсивно изучается в последние годы и применяется для обработки аналоговой информации [1, 2]. Суть эффекта заключается в том, что в результате нелинейного взаимодействия встречных поверхностных акустических волн возникает постоянное во времени электрическое поле, под действием которого изменяется заряд в приповерхностной области полупроводника, причем часть его захватывается поверхностными состояниями. Считывание запомненного на ловуш-

ках заряда осуществляется при нелинейном взаимодействии с ним поверхностной акустической волны удвоенной частоты (считывающей). Амплитуда результирующего сигнала памяти в различные моменты прихода считывающей волны дает информацию о релаксации заряда на поверхностных состояниях полупроводника.

С целью определения типов состояний, на которых реализуется акустоэлектронное запоминание, и их параметров можно использовать традиционные методы исследования поверхности полупроводников: [3] — изучение влияния внешних воздействий на релаксационные процессы акустоэлектронной памяти. Кроме того, такое исследование представляет интерес для оценки оптимальных характеристик акустоэлектронных устройств обработки информации и их изменений в результате внешних воздействий.

Экспериментальные исследования вакуумирования, воздействия электрического поля, освещения и изменения температуры проводились для слоистой структуры $\text{LiNbO}_3\text{—Si}$. Использовались образцы Si *n*-типа с удельным сопротивлением 50 Ом·см с обедненной поверхностью, которые механически поджимались к поверхности LiNbO_3 , при этом величина зазора составляла $\sim 0,3$ мкм.

На рис. 1 представлена блок-схема экспериментальной установки.



Ее особенностью является использование прецизионной автоматической регистрации релаксационных характеристик памяти с помощью самописца. Изменение времени задержки импульсов считывающей поверхностной волны частотой 60 МГц и волн записи частотой 30 МГц осуществлялось путем изменения частоты следования импульсов модуляции с помощью звукового генератора, который автоматически подстраивал частоты синхрониза-

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

ции импульсных генераторов в диапазоне 20 Гц — 30 кГц. Для возбуждения поверхностных волн в подложке использовались встречно-штыревые преобразователи, на которые подавались радиопульсы соответствующих частот с амплитудой (после усиления) до 20 В. Для выделения импульса памяти применялась схема стробирования входа приемника.

Исследование акустоэлектронного запоминания проводилось на образце, находящемся в вакууме. Вакуумирование нарушало адсорбционное равновесие на поверхности полупроводника. Это, в свою очередь, сказывалось на релаксационных свойствах состояний, имеющих адсорбционную природу, — медленных поверхностных состояний с характерными временами релаксации порядка нескольких десятков миллисекунд. Если акустоэлектронное запоминание происходило на этих состояниях, то можно было ожидать, что параметры устройств памяти окажутся нестабильными, зависящими от состава газовой среды.

В наших экспериментах осуществлялась регистрация зависимости амплитуды сигнала памяти от времени задержки считывающей волны при вакуумировании образцов от нормального давления воздуха (с раз-

личной влажностью) до 10^{-2} мм рт. ст. При этом изменений релаксационных свойств процесса запоминания в пределах ошибки эксперимента (5%) обнаружено не было. Нечувствительность процесса к адсорбционным воздействиям и порядок величин характеристических времен процесса релаксации (несколько десятков микросекунд) позволяют заключить, что определяющую роль в акустоэлектронном запоминании играют не медленные поверхностные состояния, возникающие в результате адсорбции молекул газов на поверхности полупроводника («внешние» поверхностные состояния), а быстрые поверхностные состояния, составляющие основу глубоких центров захвата и рекомбинации и расположенные в приповерхностном слое («внутренние» поверхностные состояния) [3].

Появление дополнительной концентрации в зоне основных носителей заряда в результате нелинейного взаимодействия встречных волн приводит к нарушению термодинамического равновесия в полупроводнике. Процесс релаксации в общем случае может осуществляться путем взаимодействия избыточного заряда с центрами захвата и рекомбинации.

В предположении взаимодействия с одной из зон только центров захвата кинетика установления равновесия описывается уравнением Шокли—Рида [3], а характеристическое время релаксации определяется следующим образом [4]:

$$\tau_p = \frac{1}{\alpha_n n_s}, \quad (1)$$

где $\alpha_n = \sigma_n V_T$ — вероятность захвата электронов, σ_n — сечение захвата, V_T — тепловая скорость электронов. Поверхностная концентрация электронов в зоне проводимости n_s зависит от поверхностного потенциала, определяемого амплитудой поверхностной акустической волны следующим образом:

$$n_s = n_i \exp \frac{e\varphi_s}{kT},$$

где n_i — концентрация носителей в собственном полупроводнике, определяемая статистикой Больцмана:

$$n_i = N_C \exp \left(-\frac{E_C - E_F}{kT} \right),$$

N_C — эффективная плотность состояний в зоне проводимости. Учитывая температурную зависимость $V_T \sim T^{1/2}$ и $N_C \sim T^{3/2}$, легко видеть, что $\tau_p \sim \frac{1}{T^2} \exp \frac{A}{kT}$. Поэтому зависимость величины τ_p от $1/T$ должна представляться в полулогарифмическом масштабе прямой с наклоном A/k .

Экспериментальные исследования температурных характеристик памяти проводились в диапазоне температур $-15 \div +45^\circ \text{C}$ при вакуумировании слоистой структуры. Полученная зависимость логарифма амплитуды сигнала памяти $\ln U_n$ от времени задержки считывающей волны при различных температурах приведена на рис. 2. На рис. 3 представлены полученные зависимости величин $\ln \tau_p$ от $1/T$. Зависимость действительно близка к прямой, наклон которой позволяет определить энергетическое положение уровня захвата, на котором реализуется запоминание.

В эксперименте наблюдалось увеличение времени релаксации (с 5

до 115 мкс) при уменьшении температуры в указанном диапазоне, что характерно для центров захвата в полупроводнике, в отличие от центров рекомбинации, времена релаксации которых уменьшаются при уменьшении температуры [3].

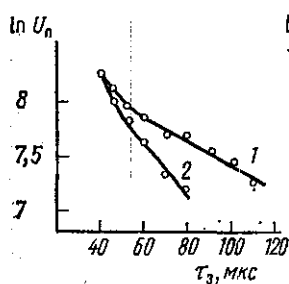


Рис. 2. Зависимость логарифма амплитуды сигнала памяти от времени задержки считывающего импульса: $t = 35$ (1) и 45 (2) °C

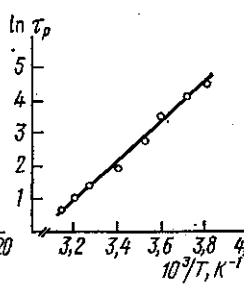


Рис. 3. Зависимость логарифма времени релаксации от обратной температуры

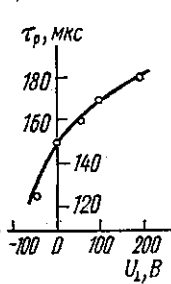


Рис. 4. Зависимость времени релаксации от приложенного напряжения

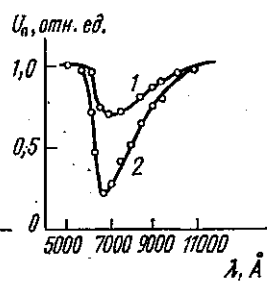


Рис. 5. Спектральная зависимость амплитуды сигнала памяти: $\tau_s = 300$ (1) и 500 (2) мкс

Таким образом, эксперимент позволяет установить, что процесс акустоэлектронного запоминания происходит на центрах захвата полупроводника, которые, согласно данным рис. 3, являются донорными уровнями с энергией 0,27 эВ. Отметим, что модель запоминания на одном уровне, по-видимому, справедлива лишь для больших значений времени памяти. Наличие двух прямолинейных участков на рис. 2 свидетельствует о том, что электроны захватываются системой центров с различными временами релаксации и энергетическими положениями.

Полученные данные могут быть использованы также для оценки температуры стабилизации, необходимой для работы акустоэлектронного устройства в заданном интервале изменения времени памяти.

Традиционным методом исследования релаксационного процесса является метод эффекта поля. Приложение внешнего поперечного электрического поля приводит к значительному изменению поверхностной концентрации носителей в полупроводнике. Величина поверхностной концентрации носителей n_s , в свою очередь, согласно (1), определяет характерное время релаксации заряда на поверхностных состояниях полупроводника. Поэтому можно ожидать значительного изменения времени памяти под действием внешнего поперечного электрического поля. На рис. 4 приведена полученная экспериментально зависимость времени релаксации сигнала памяти от величины и полярности постоянного напряжения U_{\perp} , приложенного к структуре $\text{LiNbO}_3\text{—Si}$. Для исследуемого образца Si n -типа наблюдалось увеличение времени релаксации от 130 до 180 мкс при изменении U_{\perp} от -50 до $+200$ В. Характер зависимости $\tau_p(U_{\perp})$ нетрудно объяснить на основе соотношения (1). Действительно, отрицательная полярность U_{\perp} для полупроводника n -типа вызывает увеличение поверхностной концентрации основных носителей (электронов), что, согласно (1), приводит к уменьшению τ_p . Аналогичным образом смена знака U_{\perp} приводит к обеднению поверхностной области электронами и соответствующему увеличению времени памяти.

Более сильное влияние электрического поля на релаксационные характеристики запоминания может быть достигнуто за счет уменьше-

ния толщины диэлектрической подложки (в нашем случае ~ 3 мм), на которой падает значительная часть приложенного напряжения.

Полученные данные показывают, что эффект поля может быть использован для управления характеристиками акустоэлектронного запоминания в достаточно широких пределах, что необходимо, например, для компенсации температурных изменений времен памяти.

В отличие от эффекта поля освещение полупроводника приводит к образованию неравновесных электронов и дырок, и нарушается концентрация носителей как в зоне проводимости, так и в валентной зоне. Это изменяет поверхностную проводимость полупроводника за счет появления избыточных носителей заряда и их захвата или рекомбинации на поверхностных состояниях. Для исследования влияния этого процесса на акустоэлектронное запоминание нами изучались спектральные характеристики релаксации памяти в области края собственного поглощения.

На рис. 5 приведены полученные зависимости амплитуды сигнала памяти от длины волны падающего света. Зависимости имеют ярко выраженный резонансный характер: уменьшение амплитуды и времени релаксации в области 5900—6800 Å и дальнейшее восстановление амплитуды сигнала памяти до «темновой». Для объяснения уменьшения U_p можно предположить, что это связано с возможным прилипанием дырок на поверхностные состояния, занятые электронами, — наиболее вероятным процессом для образцов *n*-типа с обедненной поверхностью в условиях фотогенерации носителей. При этом значения энергий фотонов позволяют заключить, что часть энергии расходуется на образование пары электрон—дырка (1,1 эВ), а другая часть передается в форме кинетической энергии возникающим носителем заряда, что может привести к захвату дырки поверхностным центром с соответствующей энергией. Согласно рис. 5 значения энергий этих поверхностных состояний составляют 0,5—1,0 эВ и хорошо соответствуют размерам запрещенной зоны Si. Из рис. 5 видно, что имеет место непрерывное изменение энергий уровней в запрещенной зоне; некоторое сужение спектральной зависимости по энергии при больших τ_s может свидетельствовать об уменьшении количества уровней, участвующих в релаксации.

Восстановление амплитуды сигнала памяти и времени релаксации вне области собственного поглощения, по-видимому, связано с уменьшением поверхностной концентрации носителей заряда до «темнового» значения.

Таким образом, спектральные характеристики акустоэлектронной памяти позволяют получить информацию об энергетической структуре поверхностных состояний и кинетике процессов захвата и рекомбинации в полупроводнике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Коршак Б. А., Лямов В. Е., Солодов И. Ю. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, с. 423. [2] Коршак Б. А., Лямов В. Е., Солодов И. Ю. Микроэлектроника, 1977, 6, № 4, с. 331. [3] Ржанов А. В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М.: Наука, 1971. [4] Bers A., Cafarella J. H. IEEE US Symp. N. Y., 1974, p. 778.

Поступила в редакцию
01.10.84