

Исследование динамических характеристик границы раздела полупроводник–диэлектрик

© Я.Г. Федоренко, А. Малинин*, А.М. Свездлова

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410071 Саратов, Россия

* Electron Physics Laboratory, Helsinki University of Technology,
Otakaary 7A, FIN-02150 ESPOO, Finland

(Получена 7 апреля 1998 г. Принята к печати 27 апреля 1998 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования процессов релаксации заряда в структуре металл–диэлектрик–полупроводник с окислами редкоземельных элементов Gd_2O_3 и Lu_2O_3 методом релаксационной емкостной спектроскопии глубоких уровней, нелинейных колебаний в структуре металл–диэлектрик–полупроводник, подключенной к внешней цепи с индуктивностью. На основе анализа результатов релаксационной емкостной спектроскопии глубоких уровней и изменения конфигурации области управляющих параметров "амплитуда–частота" приложенного напряжения с температурой показано, что генерация нелинейных колебаний в структуре металл–диэлектрик–полупроводник определяется свойствами границы раздела диэлектрик–полупроводник, в частности плотностью поверхностных состояний, величинами сечений захвата.

Одним из основных направлений развития современной твердотельной электроники является поиск и исследование динамических неоднородностей заряда в качестве носителей информации. В структурах металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) особенности динамических процессов обусловлены формированием и рассасыванием пакета носителей заряда, связанного на ловушках и в свободном состоянии на поверхности полупроводника. Для использования МДП структур в устройствах функциональной электроники необходимо установить влияние процессов генерации, накопления, рекомбинации носителей заряда с участием поверхностных состояний на формирование неустойчивости тока, являющейся причиной возникновения динамических режимов в системах с МДП структурой.

Для понимания электронных процессов на границе раздела (ГР) диэлектрик–полупроводник (ДП), приводящих к усложнению динамики тока в МДП структуре в неравновесных условиях, например, при приложении переменного напряжения, требуется объединение классического подхода к исследованию электронных процессов на ГР ДП и подхода, опирающегося на идеи и методы нелинейной динамики. Механизм возникновения нелинейных колебаний в МДП структуре тесно связан с явлениями и закономерностями протекания электронных процессов на поверхности полупроводника, изучаемыми в рамках классических методов исследования.

Цель работы — установление взаимосвязи процессов релаксации заряда в МДП структуре и возникновения сложных динамических режимов в простейшей электронной системе — последовательный неавтономный контур с МДП структурой. Нами проведено экспериментальное исследование особенностей релаксации электронных процессов на ГР окисел редкоземельных элементов (ОРЭЭ)—кремний методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), позволяющим получить как количественную оценку параметров поверх-

носных состояний (ПС) (например, сечения захвата), так и провести качественных анализ процессов релаксации носителей заряда в МДП структуре в совокупности с результатами исследования нелинейных колебаний.

1. Методика эксперимента

Исследовались образцы с окислами редкоземельных элементов (лютеция Lu_2O_3 , гадолиния Gd_2O_3). Создание окисных пленок осуществлялось термическим окислением металлических пленок этих элементов в вакууме. Окисление проводилось в потоке осушенного кислорода или на воздухе при температуре $500^\circ C$ в течение 15–20 мин. Алюминиевые электроды получали методом термического испарения в вакууме, площадь электродов составляла от $3.3 \cdot 10^{-3}$ до $5.0 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. С обратной стороны пластины на шлифованную сторону термическим испарением наносился контакт из алюминия. Оценка основных электрофизических параметров пленок — диэлектрической проницаемости, поверхностного эффективного заряда, зависимости поверхностного потенциала от напряжения на полевом электроде и др. проводилась по высокочастотным (ВЧ) вольт-фарадных характеристикам (ВФХ), измеренным на частоте 1 МГц.

РСГУ спектры получали на измерительном комплексе DLS-82, имеющем следующие технические характеристики. Чувствительность определения емкости $\Delta C = 2 \cdot 10^{-5} \text{ пФ}$ для отношения сигнал к шуму $SNR = 1$. Диапазон частот заполняющего импульса от 2.5 до 2500 Гц, амплитуда $\Delta U = 0.1 \text{ В}$. Имеющееся программное обеспечение позволяло проводить измерения в реальном масштабе времени, идентификацию ошибок, анализ полученных данных. Методика измерения и обработка спектров выбирались на основе анализа работ [1–3]. Чтобы избежать трудностей, связанных с наличием подвижного заряда в окисле, перезарядки

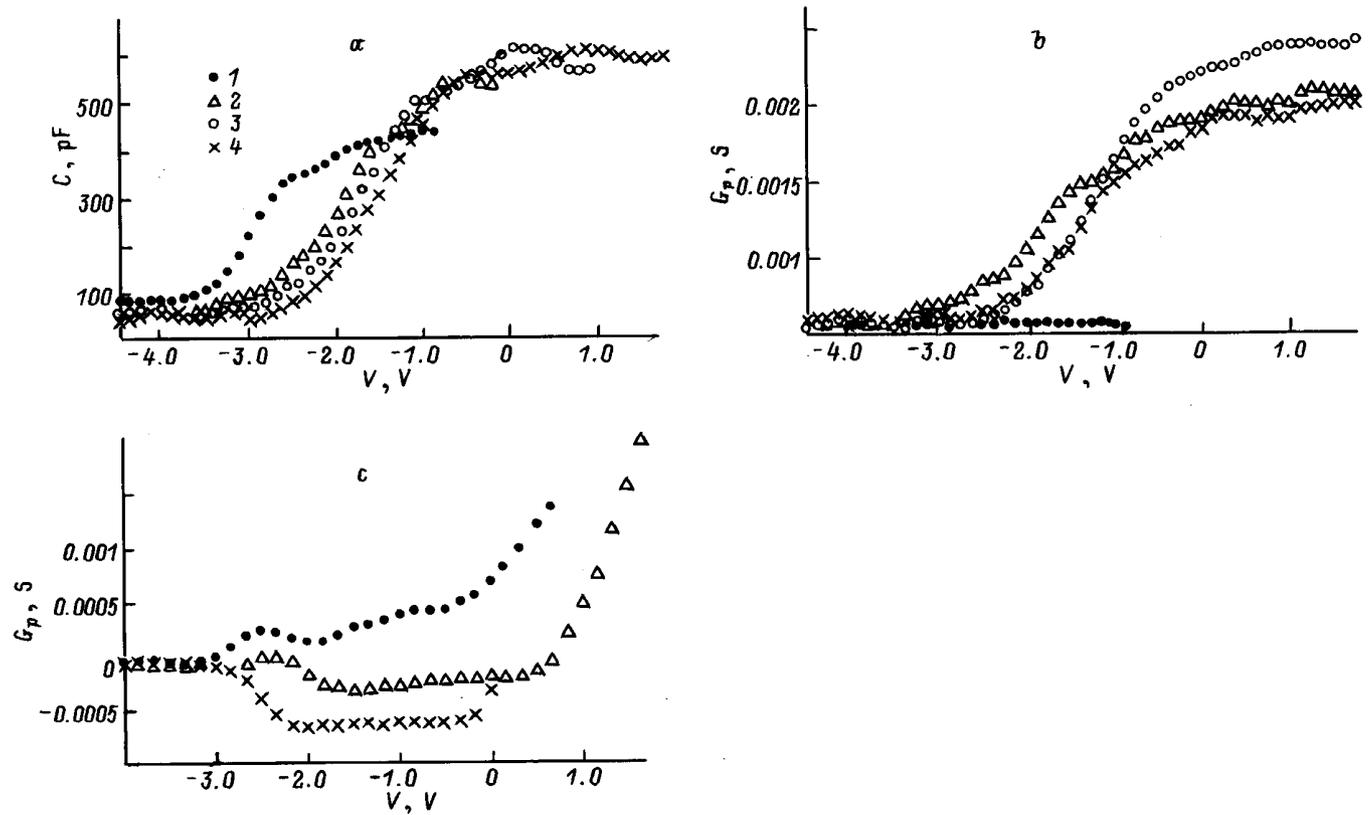


Рис. 1. Вольт-фарадные (а) и вольт-сиemensные (b, c) характеристики МДП структур с окислом Gd_2O_3 при различных температурах, К: 1 — 300, 2 — 212, 3 — 166, 4 — 77.

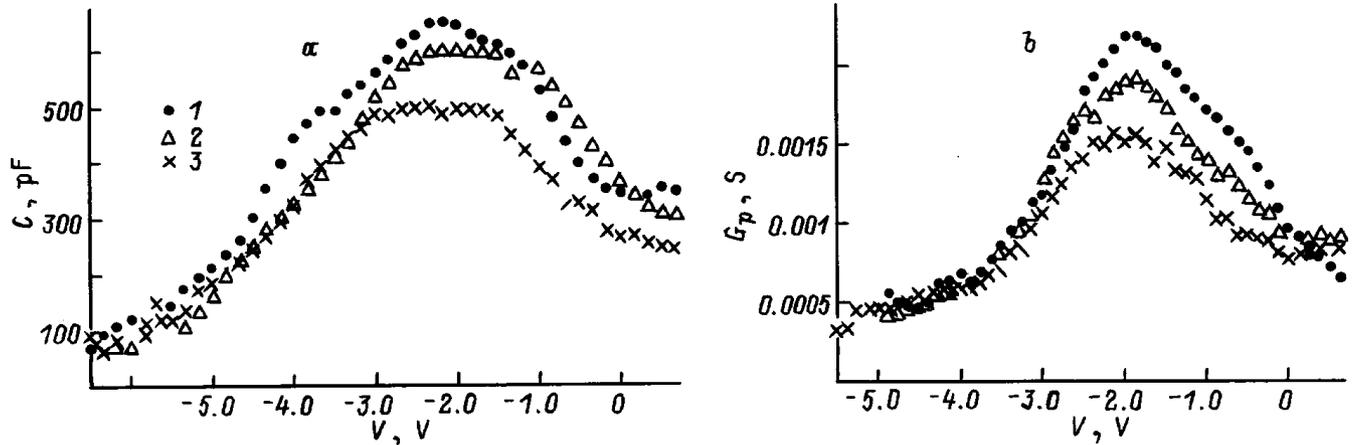


Рис. 2. Вольт-фарадные (а) и вольт-сиemensные (b) характеристики МДП структур с окислом Lu_2O_3 при различных температурах, К: 1 — 300, 2 — 140, 3 — 77.

центров захвата электронов в диэлектрике при туннелировании, способных также давать вклад в общий сигнал при значениях поверхностного потенциала, близких к обогащающим, проводилась предварительная полевая обработка образцов при отрицательном смещении $U = -4 \div -6$ В в течение одного часа, что позволяло добиться оттока положительного заряда в окисле к металлу.

2. Результаты и их обсуждение

Вольт-фарадные характеристики образцов имели вид, типичный для МДП структур (рис. 1, а, 2, а). Для образцов с пленками Gd_2O_3 (рис. 1, а) характерно наличие положительного встроенного заряда, напряжение плоских зон $V_{fb} = -2.6 \div -1.8$ В, фиксированный заряд в диэлектрике $Q_f = (3.2 \div 3.8) \cdot 10^{-8}$ Кл/см², крутизна

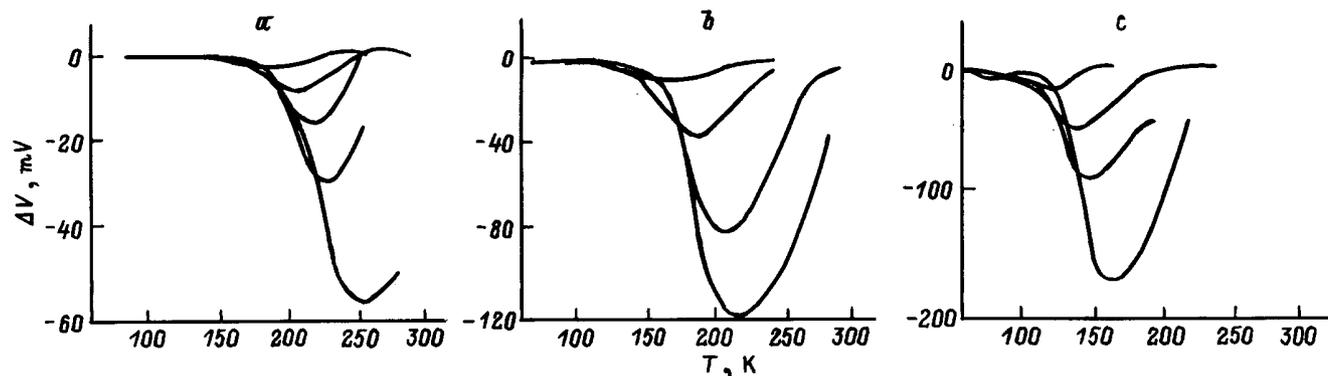


Рис. 3. РСГУ спектры МДП структур с окислом Gd_2O_3 при различных значениях поверхностного потенциала φ_s , эВ: a — 0.42, b — 0.28, c — 0.2.

ВФХ $(1/C) \cdot dC/dV = 0.5 \div 0.6 \text{ В}^{-1}$, коэффициент перекрытия емкости составлял 10–12 для различных образцов. Значение диэлектрической проницаемости ϵ , определенное по ВЧ ВФХ на частоте 1 МГц, составляло 10–12. На зависимостях активной составляющей проводимости от напряжения G_p-V наблюдался плавный рост проводимости при переходе от обеднения к обогащению, насыщение в области инверсии (рис. 1, b). Для ряда образцов при понижении температуры имели место смена знака активной составляющей проводимости (рис. 1, c) в области значений поверхностного потенциала, соответствующих переходу от инверсии к обеднению поверхности, и участок слабой зависимости G_p от V при обедняющих изгибах зон, сменяющийся ростом проводимости при обогащении. Такой характер зависимости G_p-V с понижением температуры возможен в случае изменения заряда ПС, при пересечении уровнем Ферми уровня залегания ПС до напряжений, соответствующих инверсии поверхности. Наблюдаемый эффект перезарядки характерен для ПС с малыми величинами сечений захвата. Сдвиг ВФХ в сторону положительных напряжений в понижении температуры, увеличение емкости структуры, изменение наклона характеристик на участке обеднения подтверждают предположение об увеличении отрицательного заряда ПС.

МДП структуры с окислом Lu_2O_3 отличались меньшими значениями напряжения плоских зон, $V_{fb} = -1.4 \div -1.0 \text{ В}$ (на рис. 2, a), следовательно, меньшими значениями фиксированного заряда в диэлектрике $Q_f = (8.2 \div 9.5) \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$. Характерным для вольт-сименсных зависимостей (рис. 2, b) является наличие максимума при напряжении плоских зон и тенденции к насыщению в области напряжений, соответствующих инверсии. Оценка плотности ПС по величине пика на кривых G_p-V дала значение $\sim (1.8 \div 2.8) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. С понижением температуры происходит некоторое уменьшение емкости и проводимости при напряжениях, больших напряжений плоских зон. ВФХ смещаются по оси напряжений параллельно, без значительного изменения наклона, сдвиг напряжения плоских зон составляет

$\Delta V_{fb} = -0.2 \div -0.25 \text{ В}$, что говорит о непрерывном распределении ПС или их постоянном вкладе в емкость при относительно невысокой плотности. Увеличение положительного напряжения вызывало спад как активной, так и реактивной составляющей проводимости, что свидетельствует о неравновесном заполнении ПС, увеличении утечки электронов через диэлектрик, приводит к уменьшению обогащения на поверхности кремния и, соответственно, к снижению емкости и проводимости.

На РСГУ спектрах образцов также наблюдались особенности, связанные с индивидуальностью границы раздела, формируемого различными диэлектриками. Рассмотрим особенности спектров МДП структур с Gd_2O_3 . На рис. 3 показано семейство кривых, измеренных при различных значениях поверхностного потенциала. С уменьшением обедняющего напряжения происходит плавный сдвиг спектров в область низких температур, что характерно для непрерывного распределения ПС по энергии. Характерной особенностью спектров является сильная зависимость амплитуды сигнала от температуры. Как показано в [4], подобная зависимость амплитуды сигнала в образцах — $p-n$ -переход или барьер Шоттки — может быть обусловлена взаимодействием носителей заряда с обеими разрешенными зонами. В этом случае в аналитическом выражении для РСГУ спектров появляется амплитудный множитель, зависящий от температуры:

$$\begin{aligned} A_1 &= e_n / (e_n + e_p) \\ &= 1 / [1 + (c_p N_v / c_n N_c) \cdot \exp(-(E_p - E_n) / kT)] \\ &\equiv 1 / [1 + \lambda \cdot b \cdot \exp(\Delta E / kT)], \end{aligned}$$

где $\Delta E = E_p - E_n$, $b = N_v / N_c$, $\lambda = c_p / c_n$. Видно, что если амплитуда растет с понижением температуры, то уровень расположен выше середины запрещенной зоны ($E_n < E_p$). Оценка величины сечения захвата по зависимостям Аррениуса дала значения $\sigma_n = 2.8 \cdot 10^{-20} \div 1.2 \cdot 10^{-21} \text{ см}^{-2}$ в интервале энергий $E_n = 0.268 \div 0.157 \text{ эВ}$ от дна зоны проводимости, подтверждающие ранее высказанное предположение.

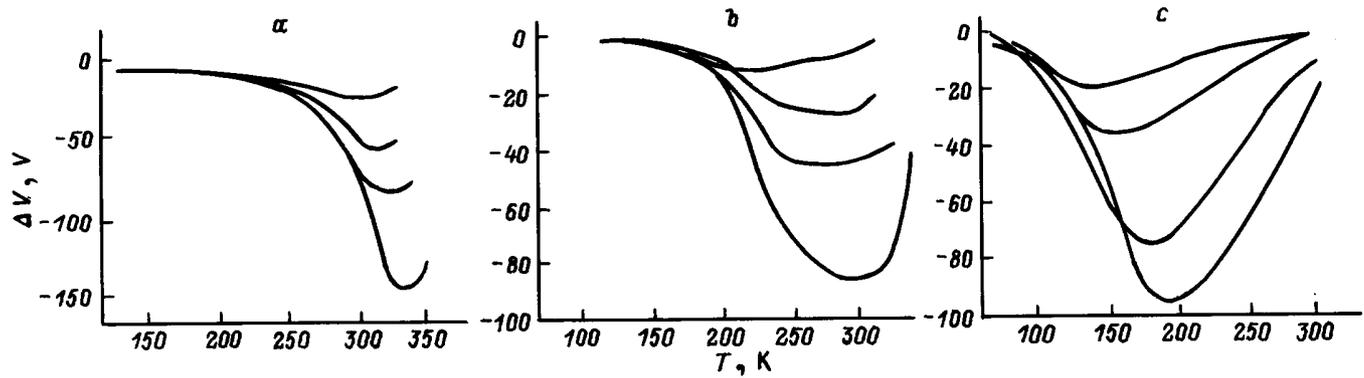


Рис. 4. РGV спектры МДП структур с окислом Lu_2O_3 при различных значениях поверхностного потенциала φ_s , эВ: a — 0.42, b — 0.28, c — 0.2.

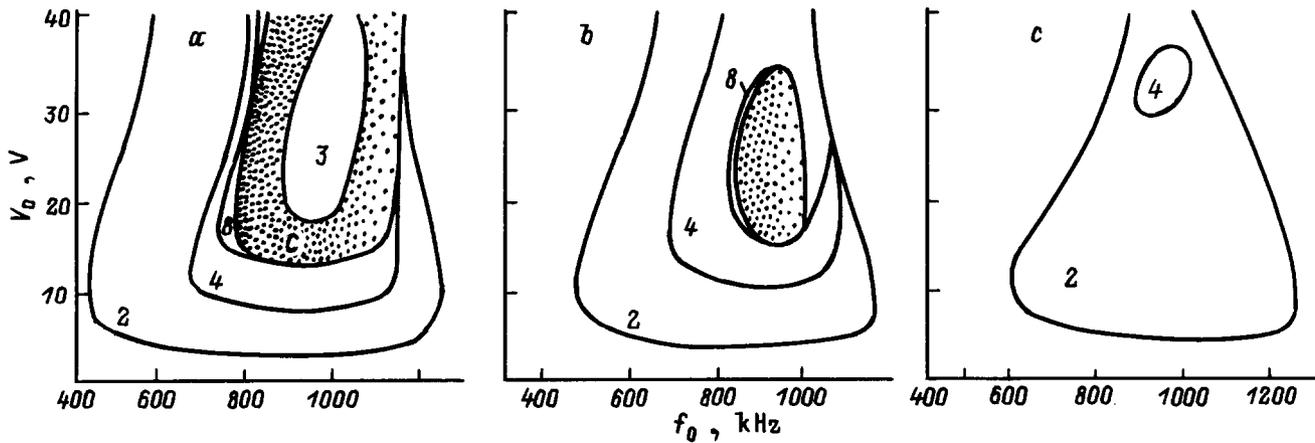


Рис. 5. Диаграммы колебательных режимов в цепи с МДП структурой с окислом Gd_2O_3 при различных температурах, К: a — 300, b — 220, c — 180. Цифрами 1, 2, 3, 4, 6, 8 обозначены длительности периода колебаний, кратного периоду внешнего напряжения T_0 . С — область генерации хаотических колебаний.

Для МДП структур с окислом Lu_2O_3 (рис. 4) наблюдались более высокотемпературные пики, что показывает наличие глубоких ПС с энергией $E_n = 0.45 \div 0.4$ эВ. Амплитуда пиков слабо уменьшается с понижением температуры, а при значениях поверхностного потенциала, соответствующих слабому обеднению поверхности, практически не изменяется. Ширина пиков существенно возрастает с уменьшением поверхностного потенциала, что говорит о заполнении электронами тех уровней, которые находятся выше уровня Ферми. Вследствие отсутствия методик обработки спектров такого сложного состава количественная оценка сечений захвата не проводилась. Попытки разделить вклад ПС выше и ниже уровня Ферми использованием меньшей амплитуды заполняющего импульса $\Delta V = 0.05$ В не дали положительного результата.

Общей особенностью спектров является уменьшение амплитуды пиков с понижением частоты заполняющих импульсов от 2500 до 2.5 Гц, что показывает вклад медленных ПС.

Анализ таких характеристик спектров, как амплитуда, ширина пика в зависимости от температуры и поверхностного потенциала позволяет обнаружить особенности взаимодействия носителей с обеими зонами, сделать предположение о глубине уровня, его положение относительно середины запрещенной зоны. Так, монотонное уменьшение амплитуды сигнала с ростом температуры для МДП структур с окислом гадолиния (рис. 4) свидетельствует о наличии непрерывного распределения ПС с минимумом распределения вблизи середины запрещенной зоны кремния.

Для МДП структур с окислом лютетия зависимость амплитуды сигнала от температуры имеет немонотонный характер, наблюдается увеличение амплитуды при температурах, близких к комнатной, что говорит о вкладе глубоких поверхностных центров в общий сигнал. На основании полученных данных можно заключить, что процессы релаксации в границе раздела ОРЗЭ–кремний происходят при взаимодействии поверхностных состояний с обеими разрешенными зонами, для границы

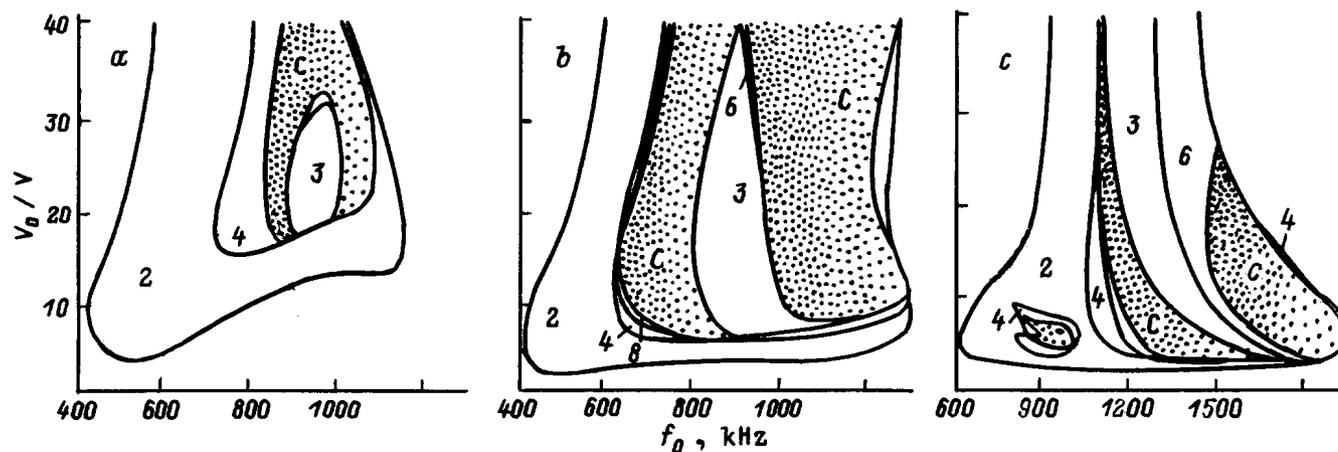


Рис. 6. Диаграммы колебательных режимов в цепи с МДП структурой с окислом Lu_2O_3 при различных температурах, К: *a* — 300, *b* — 180, *c* — 77. Обозначения приведены в подписи к рис. 5.

раздела $\text{Si-Gd}_2\text{O}_3$ характерно наличие ПС в верхней половине запрещенной зоны с малыми сечениями захвата, обуславливающими увеличение отрицательного заряда ПС с понижением температуры и появление инверсии при обедняющих значениях поверхностного потенциала. Для структур с окислом Lu_2O_3 на границе раздела обнаружено наличие глубоких поверхностных центров вблизи середины запрещенной зоны, дающих существенный вклад в сигнал при высоких температурах $T = 310 \div 340$ К.

Исследование температурной зависимости возбуждения колебаний в последовательном контуре с МДП структурой показало, что топология диаграмм режимов определяется главным образом процессами перезарядки ПС. На рис. 5 показаны диаграммы колебательных режимов для структур с окислом Gd_2O_3 . Видно, что с понижением температуры динамика тока в системе характеризуется переходом к колебаниям с меньшим периодом nT_0 , $n = 2$. Хаотические колебания не возникают ниже $T = 190 \div 170$ К во всем диапазоне значений частоты и амплитуды приложенного напряжения. Такой характер температурных изменений диаграмм режимов можно связать с возникновением отрицательного заряда ПС при этих температурах, что вызывает рекомбинацию электронов с неосновными носителями в условиях инверсии, приводя к установлению исходного зарядового состояния в течение одного периода внешнего воздействия.

На рис. 6 показаны диаграммы режимов в координатах "амплитуда–частота внешнего напряжения" для МДП структуры с окислом Lu_2O_3 . Как видно, область хаотизации при всех температурах разделена на два "рукава", между которыми наблюдаются периодические режимы $3T_0$, $6T_0$. При уменьшении температуры образца от 300 до 180 К диапазон частот и амплитуд воздействия, при которых возможно возбуждение нелинейных колебаний, расширяется, но с дальнейшим понижением тем-

пературы область существования хаотических колебаний ограничивается сверху значениями амплитуд внешнего воздействия $V_0 = 25$ В, с ростом амплитуды частотный диапазон существования колебаний периода $2T_0$, $3T_0$, $4T_0$, $6T_0$ сужаются.

Изменение топологии диаграмм режимов на плоскости "амплитуда–частота внешнего воздействия" можно объяснить следующим образом. С понижением температуры в процесс релаксации включаются ПС с меньшей энергией, значения амплитуды внешнего напряжения, необходимые для заполнения уровня, уменьшаются. Сдвиг диапазона частот от 400–1100 к 600–1600 кГц подтверждает включение в процесс релаксации ПС и с меньшими временами релаксации. Однако существенные различия топологии диаграмм режимов для различных диэлектриков не могут быть объяснены в рамках изменения равновесного заполнения ПС с понижением температуры. Объяснить сохранение разнообразия типов колебаний при азотных температурах в МДП структурах с окислом Lu_2O_3 возможно, включив в рассмотрение более глубокие поверхностные уровни. Выброс носителей в зону проводимости при низких температурах несущественен в силу его термоактивационной природы. В качестве причины сохранения генерации сложных колебаний при низких температурах в образцах с Lu_2O_3 можно предположить отсутствие равновесного заполнения поверхностных состояний, приводящего к возможности динамического перераспределения носителей между ПС и зонами при приложении переменного внешнего напряжения. Таким образом, в случае неравновесного заполнения ПС в процесс обмена носителями между зонами включаются ПС из более широкого интервала по энергии, характеризующиеся более широким набором времен релаксации, что позволяет наблюдать колебательные режимы при низких температурах. Неравновесное заполнение ПС является причиной существенного расширения пика РСГУ сигнала с понижением температуры

и согласуется с измерениями вольт-фарадных и вольт-сименсных характеристик. Следует отметить хорошее совпадение интервала температур $T = 160 \div 220$ К, в котором наблюдалось расширение пиков РСГУ, и температур $T = 150 \div 220$ К где происходило увеличение диапазона частот и амплитуд внешнего напряжения, при которых возбуждались нелинейные колебания, в том числе и хаотические.

Таким образом, проведенные измерения электрических свойств границы раздела Si-OP3Э, спектров РСГУ для них и колебаний тока в контуре с МДП структурой позволили обнаружить ранее не известные связи между такими параметрами, как плотность ПС, их сечение захвата, согласующиеся с данными РСГУ и условиями генерации нелинейных колебаний. Такой подход дает новую возможность определения неравновесных свойств интерфейса при исследовании электронных процессов на поверхности полупроводника.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта для молодых ученых в системе госкомвуза РФ, организация, проводившая конкурс, Санкт-Петербургский университет.

Список литературы

- [1] K. Yamasaki, M. Yoshida, T. Sugano. Jap. J. Appl. Phys., **18**, 113 (1979).
- [2] D.S. Gusta, M.M. Chandra, V. Kumar. Phys. St. Sol. (a), **80**, K209 (1983).
- [3] T. Katsube, K. Kakimoto. J. Appl. Phys., **52**, 3504 (1983).
- [4] А.А. Лебедев. ФТП, **31**, 437 (1997).

Редактор В.В. Чалдышев

Investigation of dynamical characteristics of insulator–semiconductor interface

Y.G. Fedorenko, A. Malinin*, A.M. Sverdlova

Saratov State University, 470071 Saratov, Russia

* Electron Physics Laboratory, Helsinki University of Technology, Otakaary 7A, FIN-02150 ESPOO, Finland

Abstract An investigation of relaxation processes on rare earth thin film oxide–silicon interface with Gd_2O_3 , Lu_2O_3 as insulator has been conducted by DLTS technique. A behavior of complex oscillations in a nonlinear system of a thin film MIS-structure connected to external electric circuit with inductance has been studied experimentally in a wide temperature range from 77 K up to 300 K.

E-mail: gluhovsk@scnit.saratov.su

* : amalinin@elfys4.hut.fi