

©1994 г.

НИЗКОВОЛЬТНЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТОКА В ДЛИННЫХ ОБРАЗЦАХ AlGaAs/GaAs ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ И СВЧ ПОЛЕЙ

*В.И.Борисов, С.Г.Дмитриев, В.Е.Любченко, Б.К.Медведев,
В.Г.Мокеров, К.И.Спиридонов*

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
141120, Фрязино, Россия
(Получена 26 октября 1993 г. Принята к печати 2 февраля 1994 г.)

Представлены результаты исследования высокочастотных (10÷100 МГц) осцилляций и процессов переключения тока в длинных (до 5 мм) образцах селективно легированных гетероструктур на основе $Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs$. Проведено сравнение импульсных и СВЧ вольт-амперных характеристик в диапазоне температур 77÷300 К. Показано, что возникновению осцилляций, наблюдавшихся в узком диапазоне температур вблизи $T \approx 200$ К, предшествует быстрое (≈ 10 нс) обратимое переключение системы в неоднородное более высокоомное состояние. Отмечено, что заметное уменьшение тока после воздействия импульса СВЧ излучения наблюдается уже при небольших значениях СВЧ поля, $\sim 10^2 \div 10^3$ В/см в зависимости от температуры. Показано, что долговременная часть процесса восстановления тока после воздействия достаточно мощного импульса СВЧ излучения имеет активационный характер с энергией ~ 30 мэВ.

Полупроводниковые селективно легированные гетероструктуры (СЛГС) на основе гетероперехода $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ характеризуются рекордными величинами подвижности электронов в двумерном канале ($\mu \sim 10^6 \div 10^7$ см²/В·с при гелиевых температурах и $\mu \sim 10^5$ см²/В·с при азотных) и высокими значениями дрейфовых скоростей электронов в сильных полях ($\sim 10^3 \div 10^4$ В/см), что и обеспечивает успех применения этих структур для изготовления современных высокочастотных транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) [1-3]. Под действием внешних факторов (электрическое поле, подсветка и др.) в этих структурах и транзисторах на их основе могут возникать нестационарные процессы и неустойчивости, ограничивающие возможность достижения высоких дрейфовых скоростей электронов и плотностей тока. Некоторые из таких процессов связаны с захватом электронов на DX-центры в слое AlGaAs [3]. Менее изучены высокочастотные (1÷100 МГц) колебания и процессы переключения тока, наблюдавшиеся в достаточно длинных образцах (от 10 мкм до

5 мм) при относительных невысоких величинах средних по образцу полей ($\sim 10^2 \div 10^3$ В/см). При этом форма колебаний тока и пороговые напряженности полей их возникновения в различных работах заметно отличались [4-7]. Высказанная первоначально гипотеза о связи этого явления с акустоэлектрическими доменами на границе раздела [4-5] требует дополнительных предположений для интерпретации относительно малых времен пролета, соответствующих эффективным скоростям пролета $v \simeq 10^6 \div 10^7$ см/с [6,7].

Накопление заряда в слое AlGaAs и на гетеропереходе, а также развитие неоднородностей (в частности, областей высоких полей) могут оказывать существенное влияние на осцилляции тока. Для исследования такого рода эффектов полезно сравнение вольт-амперных характеристик (ВАХ) импульсных полученных с помощью СВЧ полей, поскольку влияние процессов накопления зарядов в этих режимах существенно различно [8,9]. Кроме того, при СВЧ измерениях менее вероятно развитие неустойчивостей, связанных с процессами, возникающими под действием внешнего напряжения, что позволяет, в частности, измерять ВАХ с участками отрицательной дифференциальной проводимости.

В данной работе проведено сравнительное исследование импульсных и СВЧ ВАХ длинных образцов AlGaAs/GaAs с целью выяснения природы переходных процессов и высокочастотных неустойчивостей тока. Исследовались образцы, изготовленные из СЛГС, состоящие из последовательно выращенных на полуизолирующей подложке GaAs слоев: GaAs (нелегированный, толщина $d = 0.8$ мкм); $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ (спейсер, нелегированный, $d = 150$ Å); $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ (концентрация электронов $n = 8 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, $d = 500$ Å); GaAs (нелегированный, $d = 150$ Å). Образцы вырезались в виде прямоугольных брусков с размерами 1.0×5.0 мм. Омические контакты к ним получались сплавлением индия в атмосфере водорода. Для измерений ВАХ образец устанавливался в прямоугольном волноводе 8-миллиметрового диапазона (сечение 7.2×3.4 мм) через продольные прорези в середине его широких стенок так, чтобы контакты оказывались вынесенными за пределы волновода. Методика измерения СВЧ ВАХ с использованием для определения проводимости образца тестирующего импульса напряжения достаточно малой величины заключалась в вычислении мгновенной ВАХ образца из измеренной зависимости низкочастотной проводимости образца от мощности СВЧ излучения (см., например, [9]). Измерения проводились с использованием импульсного источника СВЧ излучения (частота 36 ГГц, длительность импульса 80 нс, частота следования импульсов 300 Гц). В качестве тестовых импульсов напряжения импульсных ВАХ использовались прямоугольные импульсы длительностью от 0.1 до 50 мкс. Величина и форма тока через образец определялись по падению напряжения на эталонном сопротивлении $R_0 = 50$ Ом, включенном последовательно с образцом. Поскольку сопротивление образца в диапазоне температур $77 \div 300$ К изменялось в пределах $0.5 \div 6$ Ом, параллельно ему и эталонному сопротивлению для согласования с выходным сопротивлением генератора прямоугольных импульсов включалось сопротивление $R = 50$ Ом. Такая схема включения образца обеспечивала возможность измерения как импульсных, так и СВЧ ВАХ. На вставке к рис. 1,а показаны

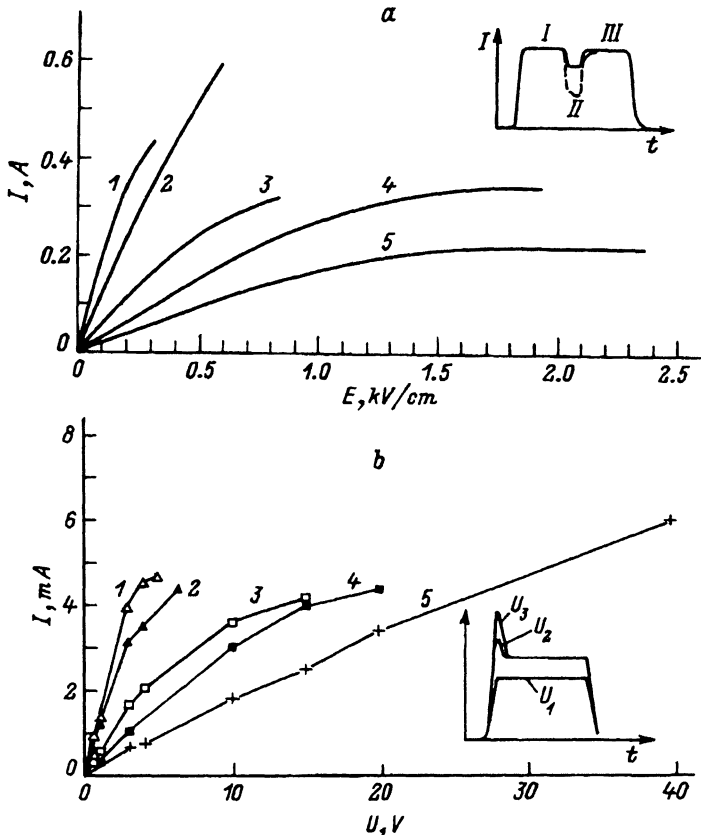


Рис. 1. ВАХ образца при температурах T , К: 1 — 77, 2 — 100, 3 — 150, 4 — 200, 5 — 265.

a — СВЧ ВАХ; на вставке — форма тестирующего импульса тока через образец в отсутствие нестационарных процессов в течение СВЧ импульса (сплошная линия) и при наличии нестационарных процессов (штриховая). b — импульсные ВАХ; на вставке — изменение формы импульса тока через образец при различных амплитудах тестирующего импульса напряжения: $U_1 < U_2 < U_3$.

формы импульса тока через образец при различных величинах падающей СВЧ мощности. Участки, обозначенные I и III, соответствуют току через образец в отсутствие СВЧ мощности (I_0), участок I — во время воздействия СВЧ излучения ($\langle I \rangle$). Наличие низковольтной неустойчивости тока в исследуемых объектах требует тщательного выбора амплитуды тестирующего импульса U_0 , причем в качестве критерия правильности выбора принималось отсутствие зависимости измеренного отношения $\langle I \rangle / I_0$ от U_0 . Для вычисления СВЧ ВАХ из измеренных зависимостей $\langle I \rangle / I_0 = f(P)$ использовалось точное решение интегрального уравнения Шлемилха [10], причем при численных расчетах экспериментальные зависимости аппроксимировались сглаживающими кубическими сплайнами [11]. Развитие нестационарных процессов в образце в течение действия импульса СВЧ излучения контролировалось по форме импульса тока через образец. На вставке к рис. 1, a штриховой линией показано характерное изменение формы импульса при изменении проводимости образца в течение действия

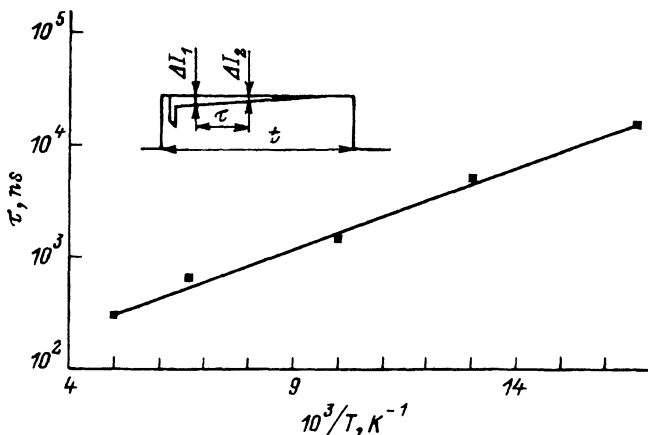


Рис. 2. Температурная зависимость времени релаксации тока через образец после воздействия мощного импульса СВЧ излучения. На вставке — иллюстрация к способу измерения τ .

СВЧ излучения. Такая форма служила признаком развития нестационарных процессов, которые ограничивали максимальные напряженности полей при измерении СВЧ ВАХ. Увеличение падающей СВЧ мощности выше порога возникновения указанных процессов приводит к появлению быстрого и медленного переходных процессов восстановления проводимости образца после воздействия импульса СВЧ излучения. В данной работе исследовалась зависимость от температуры постоянной времени (τ) медленного процесса. Принцип измерения τ иллюстрируется вставкой к рис. 2, где $\Delta l_1 = 2\Delta l_2$, т.е. τ определялось как время спада вдвое индуцированного СВЧ полем изменения проводимости, причем Δl_1 измерялось после окончания быстрого переходного процесса.

Вольт-амперные характеристики образца шириной 1.3 мм и с расстоянием между контактами 3.6 мм при различных температурах приведены на рис. 1, причем на рис. 1,а — СВЧ ВАХ, а на рис. 1,б — импульсные ВАХ. Как видно из рисунков, максимальные величины импульсных и СВЧ токов существенно различны. Конечные точки СВЧ ВАХ ($T = 77, 100, 150$ К) на рис. 1,а соответствуют развитию процесса, проявляющегося в изменении формы импульса тока через образец в течение СВЧ поля (участок II тестирующего импульса на вставке к рис. 1,а). При более высоких температурах проявление этого процесса мало заметно, и СВЧ ВАХ при 200 К снята до полей, при которых становится заметным падение тока после импульса СВЧ излучения (на участке III тестирующего импульса по отношению к участку I). При 265 К нестационарные процессы не наблюдались вплоть до полей $\gtrsim 3$ кВ/см.

Начало нелинейного участка на импульсных ВАХ соответствует появлению переходного процесса, проявляющегося в виде релаксационного спада тока (вставка к рис. 1,б). Приведенные на рис. 1,б ВАХ соответствуют токам в образце после окончания переходного процесса. Интересно отметить, что при попытках измерения СВЧ ВАХ с использованием тестирующего импульса с амплитудой выше порога обсуждаемой нелинейности нестационарные процессы, проявляющиеся в

изменении формы участка II импульса тока, показанного на вставке к рис. 1, *a*, заметны уже при малых СВЧ полях. Эти явления, а также наличие участка линейной зависимости пиковых значений импульсных токов от напряжения вплоть до напряжений, соответствующих участкам насыщения токов ВАХ на рис. 1, *b*, в совокупности свидетельствуют о том, что указанный переходный процесс соответствует быстро-му (за время порядка нескольких 10 нс или меньше в зависимости от температуры образца) обратимому переключению системы в новое, вероятно, неоднородное состояние с пониженными значениями токов. Обсуждаемый процесс предшествует порогу возникновения осцилляций, наблюдавшихся в нашем случае в области температур вблизи $T \simeq 200$ К при напряжениях $U \simeq 30 \div 60$ В ($T = 200$ К: пороговое напряжение $U_{th} = 38$ В, период осцилляций $t = 50$ нс; $U = 60$ В, $t = 30$ нс).

Таким образом, осцилляции соответствуют новому состоянию системы. Вблизи порога их появления форма осцилляций близка к синусоидальной со средним значением тока, примерно соответствующим импульсным ВАХ (и уступающим СВЧ ВАХ), и амплитудой порядка $20 \div 30\%$ от среднего уровня. Конечная точка одной из импульсных ВАХ (200 К) соответствует порогу возникновения осцилляций. При дальнейшем росте напряжения форма осцилляций становится несинусоидальной, а сами осцилляции менее стабильными. Следующий далее срыв осцилляций сопровождается значительным падением тока в импульсе с последующим процессом восстановления тока. Этот процесс — «выключение» с последующим восстановлением (и при отсутствии осцилляций синусоидальной формы) — проявляется и при других температурах и соответствует конечным точкам на импульсных ВАХ ($T = 77, 100, 150$ К). Осциллограммы тока, отражающие такого рода процессы, довольно разнообразны и в данной работе не обсуждаются.

Рассмотрим процесс восстановления тока через образец после воздействия СВЧ импульса. На рис. 2 представлена температурная зависимость времени релаксации, определяемого по двукратному уменьшению изменения тока ΔI (см. вставку к рис. 2). Как видно из рисунка, время восстановления характеризуется сильной температурной зависимостью активационного характера с энергией $E \approx 30$ мэВ. Обратим внимание, что энергия активации электронной концентрации в AlGaAs близка к этой величине [12].

Обсуждаемые нестационарные процессы обратимы, характеризуются относительно малыми временами и низкими пороговыми напряжениями и поэтому вряд ли связаны с захватом электронов DX-центрами, времена релаксации заряда на которых при низких температурах обычно значительно больше. Кроме того, характерные для этих центров длительные процессы восстановления наблюдались и в наших экспериментах, но при заметно больших значениях напряжения (при измерениях в импульсном режиме $\sim 10 \div 100$ В в зависимости от температуры). При этом относительно малые для этого процесса [3] напряженности поля ($\lesssim 10^3$ В/см) говорят о значительном развитии неоднородности в распределении электрического поля по образцу. Речь скорее может идти о накоплении подвижного и связанного зарядов в слое AlGaAs (или на гетерогранице), приводящем к возникновению неоднородного распределения потенциала и перекрытию двумерного ка-

нала проводимости с последующими процессами обратной релаксации заряда и потенциала. Формы проявления обсуждаемых процессов и последовательность их появления при понижении температуры качественно одинаковы для различных образцов, однако пороговые значения напряжений заметно отличаются, оставаясь все же невысокими, $10 \div 100$ В. Приведенные нами данные соответствуют наиболее низким пороговым значениям.

Таким образом, сравнение импульсных и СВЧ ВАХ показывает, что развитию высокочастотных ($\sim 10 \div 100$ МГц) осцилляций в длинных образцах AlGaAs/GaAs предшествует относительно быстрое (10 нс) обратимое переключение образца начиная с некоторых значений напряжения в более высокоомное неоднородное состояние, приводящее при дальнейшем росте напряжения к развитию осцилляций, наблюдаемых в узком диапазоне температур. Срыв осцилляций сопровождается падением тока с последующими (быстрыми и медленными) процессами релаксации. Более длительный процесс имеет активационный характер с энергией ~ 30 мэВ. Аналогичные процессы релаксации наблюдаются и при СВЧ воздействии, но при больших значениях напряженности поля. Эти явления заметно отличаются от процессов, обусловленных захватом заряда на DX-центры [3], и могут быть связаны с накоплением подвижного и связанного на ловушках заряда в слое AlGaAs или на гетерогранице и экранировкой потенциала этих зарядов электронами двумерного канала проводимости.

Список литературы

- [1] M.J. Kelly. *Semicond. Sci. Techn.*, **5**, 1209 (1990).
- [2] M. Feng, C.L. Lau, V. Eu, C. Ito. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1233 (1990).
- [3] P.M. Mooney. *J. Appl. Phys.*, **67**, N 3, R1 (1990).
- [4] M. Keever, T. Drummond, K. Hess, H. Morkos, B.G. Streetman. *Electron. Lett.*, **17**, 93 (1981).
- [5] N. Balkan, B.K. Ridley. *Semicond. Sci. Techn.*, **3**, 507 (1988).
- [6] P. Hendriks, A.A.M. Staring, R.G. van Welzenis, J.H. Wolter, W. Prost, K. Heime, W. Schlapp, G. Weimann. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2668 (1989).
- [7] A.J. Vickers, A. Straw, J.S. Roberts. *Semicond. Sci. Techn.*, **4**, 743 (1989).
- [8] С.Г. Калашников, В.Е. Любченко, Н.Е. Скворцова. *ФТП*, **1**, 1445 (1967).
- [9] W.T. Masselink. *Semicond. Sci. Techn.*, **4**, 503 (1989).
- [10] Э.Т. Уиттекер, Дж.Н. Ватсон. *Курс современного анализа* (М., 1963) т. 1.
- [11] Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.П. Мирошниченко. *Методы сплайн-функций* (М., Наука, 1980).
- [12] Z. Wilamowski, J. Kossut, W. Jantsen, G. Ostermayer. *Semicond. Sci. Techn.*, **6**, B38 (1991).

Редактор Л.В.Шаронова

Low-Voltage Current Instabilities in Long AlGaAs/GaAs Specimens under Action of Pulsed and SHF Fields

V.I.Borisov, S.G.Dmitriev, V.E.Lubchenko, V.I.Medvedev, V.G.Mokerov and K.I.Spiridonov

Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 141120, Fryazino, Russia