

НОВЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ОДП S-ТИПА В МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

А.М.Белянцев, А.А.Игнатов, В.И.Пискарев,
М.А.Синицын, В.И.Шашкин, Б.С.Явич, М.Л.Яковлев

Обнаружены эффекты быстродействующего переключения тока, генерации и преобразования частоты СВЧ-излучения при вертикальном транспорте в многослойных гетероструктурах на основе $n\text{-GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

В сильном электрическом поле, ориентированном вдоль слоев многослойной селективно легированной гетероструктуры (МГСЛ), электроны приобретают энергию для преодоления потенциального барьера и перехода в широкозонный материал с меньшей подвижностью носителей, что приводит к N -образной вольт-амперной характеристике (ВАХ) (пространственный аналог эффекта Ганна). Экспериментально эффект усиления колебаний, связанный с этим механизмом, продемонстрирован в диапазоне до $f = 2,5$ ГГц¹. Мы обнаружили более высокочастотные эффекты переключения ($\tau < 1$ нс), генерации ($f > 10$ ГГц) и преобразования частоты ($f \approx 150$ ГГц) в МГСЛ при вертикальном транспорте (электрическое поле перпендикулярно слоям), обусловленные возникновением S -образной ВАХ, что естественно связать с малоинерционным перегревом носителей тока активированных в надбарьерную область в условиях понижения эффективной высоты барьеров сильным электрическим полем.

1. Экспериментально исследовались МГСЛ $(n\text{-GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})_N$ с субмикронным периодом, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии². На рис. 1, а приведена $C - V$ характеристика меза-диода на основе МГСЛ $\phi \approx 100$ мкм, измеренная на частотах $f \approx \approx 20$ МГц. Величина и характерные напряжения перестройки емкости достаточно хорошо соответствуют представлению о перераспределении внешним полем электронов в потенциальных ямах МГСЛ (слои $n\text{-GaAs}$), ограниченных потенциальными барьерами (слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). Высокий уровень легирования слоев $n\text{-GaAs}$ и их малая толщина указывают на малую инерционность установления $C - V$ характеристики и на высокую добротность структуры как варакторного элемента³, что демонстрируется эффектом удвоения частоты в диапазоне $f = 75$ ГГц \rightarrow 150 ГГц на меза-диодах меньшей площади. Зависимость мощности сигнала на удвоенной частоте от смещения (рис. 2, б) хорошо коррелирует с видом $C - V$ характеристики, измеренной на низких частотах.

При напряжениях $V > V_s \approx 10$ В в области насыщения $C - V$ характеристики (по оценкам в этих условиях электроны прижаты к одной из стенок ямы) происходит процесс включения тока с S -образной ВАХ. Напряжение включения V_s возрастает пропорционально числу периодов исследованных образцов. На рис. 1, в приведен вид ВАХ МГСЛ при ее работе в качестве активного элемента в схеме вырожденного релаксационного генератора при питании источником постоянного тока. Малая длительность генерируемых структурой импульсов тока ($\tau < 1$ нс) исключает роль разогрева решетки и указывает на электронную природу процессов переключения.

При включении структуры в СВЧ-резонатор на частоту $f \approx 10$ ГГц наблюдается генерация когерентных колебаний. Зависимость генерируемой СВЧ-мощности от приложенного напряжения приведена на рис. 2. Осцилляторный характер этой зависимости возможно связан с широким частотным спектром генерируемых колебаний и (или) с богатой модовой структурой распределения высокочастотного поля в меза-диоде. Малая инерционность установления ВАХ МГСЛ подтверждается умножением частоты в диапазоне $f = 50$ ГГц \rightarrow 150 ГГц. Зависимость сигнала генерируемой третьей гармоники от мощности накачки носит пороговый характер, что связано с быстрым процессом включения тока при амплитуде высокочастотного напряжения $V_\omega > V_s$.

2. При вертикальном транспорте переход электронов в надбарьерную область (в данном случае в область с большой подвижностью) может происходить при понижении эффективной величины барьера электрическим полем и сопровождается включением тока (низкоомное состояние), а процесс восстановления высокоомного состояния осуществляется при меньших напряжениях (большой величине эффективного барьера) из-за значительного электронного разогрева (рис. 3). Расчет ВАХ в духе теории электронного перегрева компенсированных полупроводников с флуктуационным примесным потенциалом ⁴, выполненный, однако, с учетом эффекта понижения барьера и насыщения дрейфовой скорости надбарьерных электронов дает

$$V = \frac{V_s \beta}{\beta - (j/j_s) \ln(j/j_s)}, \quad V < V_s, \quad (1)$$

где $V_s = E_s d$ — напряжение включения (на одном периоде), $j_s = q n v_s$, v_s — скорость насыщения, $\beta = 3 \Delta / 2 l_e q E_s$, Δ — величина барьера в отсутствии поля, $l_e = v_s \tau_e$, τ_e — время энергетической релаксации. В состоянии поддержания тока (условие $dj/dV \rightarrow \infty$) получим $j_h = j_s / e$, $V_h = V_s e \beta / (1 + e \beta)$, $kT_h = \Delta / (1 + e \beta)$. При этом решеточная температура $kT_0 \ll \Delta$ и не оказывает существенного влияния на вид ВАХ.

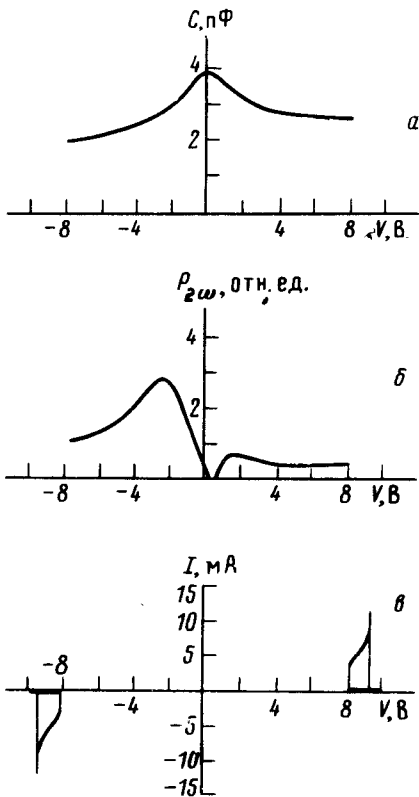


Рис. 1

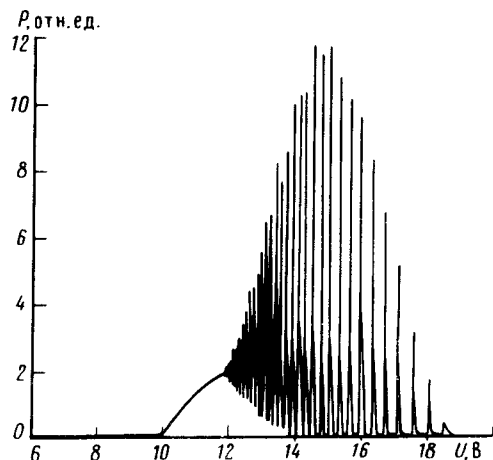


Рис. 2

Рис. 1. *a* — Зависимость емкости гетероструктуры от приложенного напряжения; *б* — зависимость мощности второй гармоники ($f = 150$ ГГц) при фиксированной мощности излучения накачки ($f = 75$ ГГц) от постоянного напряжения; *в* — ВАХ гетероструктуры в режиме генерации релаксационных колебаний

Рис. 2. Зависимость мощности излучения из резонатора с гетероструктурой на частоте 10 ГГц от постоянного напряжения внешнего источника

Для барьера с вертикальной стенкой с учетом повышения энергии носителей за счет поверхностного квантования и увеличения туннельной прозрачности верхушки барьера (эффект Фаулера — Нордхейма) $V_s = E_s d \approx 4 \Delta^{3/2} m^{1/2} d / 9 \pi q \hbar$, а при барьере треугольной формы $V_s \approx 4 \Delta / q$ (рис. 3). В нашем случае обе эти оценки, а также величина тока поддержания ($v_s \approx 6 \cdot 10^6$ см/с) близки к измеренным (рис. 1). Величина $\tau_e \lesssim 1$ пс определяется быстрым процессом релаксации энергии на оптических фононах в присутствии электрон-элек-

тронных столкновений ^{5, 6} откуда $l_e \lesssim 500 \text{ \AA}$, $V_h \gtrsim 0,75 V_s$, что соответствует наблюдаемому виду ВАХ. Малые времена максвелловской релаксации носителей тока ($\tau_M \approx 0,5\text{--}1\text{ пс}$) наряду с быстрым процессом релаксации энергии указывает на малую инерционность установления S-образной ВАХ при электронном перегреве в селективно легированных МГСЛ.

Отметим, что обнаруженные эффекты представляют интерес с точки зрения развития представлений о кинетике горячих электронов в гетероструктурах при вертикальном транспорте, что привлекает последнее время значительное внимание ^{5, 6}. С другой стороны, структуры с малоинерционной S-образной ВАХ обладают достаточно разнообразными функциональными возможностями с точки зрения приложений.

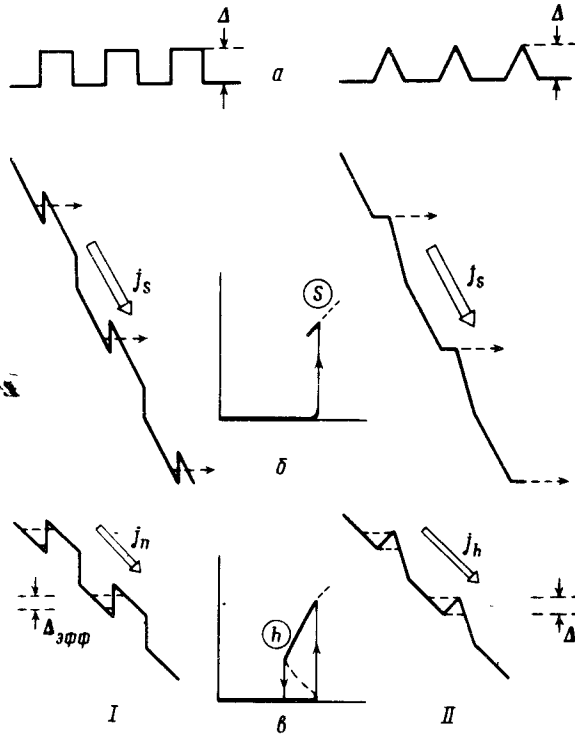


Рис. 3. Энергетические диаграммы многослойной гетероструктуры при вертикальном транспорте: а – при отсутствии поданного напряжения; б – состояние включения; в – состояние поддержания тока. I – квантовомеханическое туннелирование сквозь вертикальную стенку; II – “выплескивание” через наклоненный барьер

Авторы выражают благодарность Алферову Ж.И. за постоянное внимание к работе и поддержку.

Литература

1. Pond J.M., Kirchoefer S.W., Cukauskas E.J. Appl. Phys. Lett., 1985, 47, 1175.
2. Машевский А.Т., Сеницын М.А., Федорова О.Ф., Явич Б.С. Письма в ЖЭТФ, 1985, 11, 21.
3. Белянцев А.М., Игнатов А.А., Окомельков А.В. Тезисы III Всесоюзного симпозиума по ММ и СБММ волнам. Горький, 1980, с. 193.
4. Шкловский Б.И., Шур М.С., Эфрос А.Л. ФТП, 1971, 5, 1938.
5. Есипов С.Э., Левинсон И.Б. Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 193.
6. Yang C.H.; Carlson-Swindle J.M., Lyon S.A., Worlock J.M. Phys. Rev. Lett., 1985, 55, 2359.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
13 февраля 1986 г.