

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ
И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР
(24—25 октября 1984 г.)**

24 и 25 октября 1984 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

24 октября

1. А. А. А н д р о н о в. Инверсия населения и стимулированное миллиметровое и субмиллиметровое излучение горячих электронов в полупроводниках.

2. А. М. Б е л я н ц е в, Ю. А. Р о м а н о в. Классическая сверхрешетка — искусственный диэлектрик, нелинейные ВЧ эффекты.

3. С. В. Г а п о н о в. Сверхтонкие пленки твердых тел и многослойные структуры: метод получения, исследования, применения.

25 октября

4. А. Ф. Б о г о м о л о в. Исследование поверхности северного полушария планеты Венера (радиоизображение, географическая и тепловая карты Венеры) и разработанная радиофизическая аппаратура.

5. В. И. М о р о з, В. М. Л и н к и н, Д. Э р т е л ь. Результаты инфракрасного эксперимента на «Венере-15» и «Венере-16».

Краткое содержание трех докладов публикуется ниже.

537.311.322(048)

А. М. Белянцев, Ю. А. Романов. Классическая сверхрешетка — искусственный диэлектрик, нелинейные ВЧ эффекты. В полупроводниковой электронно-дырочной плазме, локализованной в объеме с малыми линейными размерами, возможно возникновение двух новых малодиссипативных типов нелинейной высокочастотной проводимости, обусловленных классическими размерными эффектами. Первый ^{1, 2} связан с насыщением электрической поляризации такой системы при сохраняющемся числе плазменных частиц в ней, второй ³ — с сильной зависимостью их числа от электрического поля (падения напряжения) из-за межзонного туннелирования электронов. Конкретным и перспективным примером таких систем является классическая сверхрешетка СР, состоящая из чередующихся тонких слоев полупроводника и диэлектрика. Слои диэлектрика играют роль потенциальных барьеров для электронов, локализованных в слоях полупроводника. Основные требования к ним: малая прозрачность электронам и высокая электрическая прочность, большая диэлектрическая

ческая проницаемость и, по возможности, малая толщина. Толщина полупроводникового слоя d считается большой по сравнению с характерной длиной волны де Броиля электрона, что не является принципиальным, а лишь упрощает исследование интересующих нас свойств СР.

Частотные свойства СР определяются тремя характерными временами слоя полупроводника: временем межзонной рекомбинации — $\tau_r \sim 10^{-8}$ с, обратной вероятностью межзонного туннелирования электрона в единицу времени — τ_T и временем установления квазиравновесного распределения электронов и дырок в своих зонах по энергии и толщине слоя — τ_D . С ростом d возрастают релаксационные времена $\tau_{T,D}$, что уменьшает рабочие частоты СР. Для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов оптимальные значения d лежат в области $\sim 10^{-5}$ см, при этом $\tau_D \sim \tau_T \sim 10^{-12}$ с⁻¹.

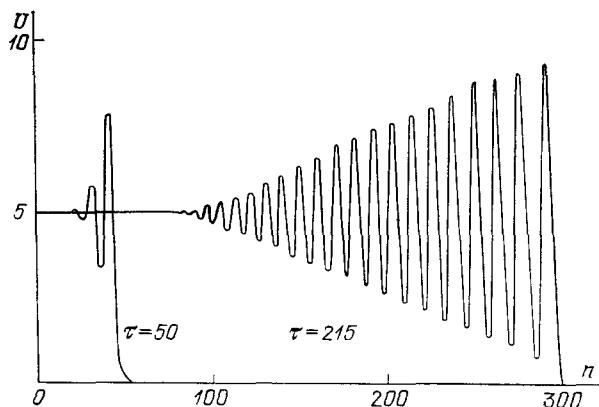
Характерные поля нелинейности E_* есть поля, под действием которых электроны (дырки) сдвигаются на расстояние порядка толщины полупроводникового слоя. Для первого типа нелинейности $E_*^{(1)} \equiv V_*^{(1)}/d = [1 + (d/r_D)^2] W/ed \sim 10^3 - 10^4$ В/см (r_D — дебаевский радиус экранирования, W — средняя энергия заряженной частицы, V — падение напряжения на слое), для второго — $E_*^{(2)} \equiv V_*^{(2)}/d = E_g/ed \sim 10^5 - 10^6$ В/см (E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника). Важно, что первый и второй типы нелинейности разнесены по полю.

В области частот $\omega \tau_* \ll 1$ (τ_* — характерное время релаксации доминирующего механизма нелинейности) поляризация СР почти успевает следить за изменением поля, и поэтому ее можно представить в виде $P(t) \approx \approx P_1(V) - \tau_* (\dot{V}/V_*) P_2(V)$. Первое слагаемое определяет реактивный ток, второе — диссипативный. Для однокомпонентной невырожденной плазмы и $d \ll r_D$ $P(t) \approx P_0 [L(V/V_*) + \tau_D(\dot{V}/V_*) L''(V/V_*)]$, где $P_0 = ned/2$, n — концентрация электронов, $V_* = 2kT/e$, $L(z) = \operatorname{cth} z - z^{-1}$ — функция Ланжевена. В области $V_*^{(1)} \ll V \ll V_*^{(2)}$ поляризация СР выходит на насыщение. С ростом V начинаются межзонные переходы электронов, в том числе при $V > E_g/e$ — туннельные. Число плазменных частиц быстро растет, что приводит к быстрому росту поляризации СР. При $V \ll V_*^{(2)} \sim 1$ В $P_1(V) \sim V^{5/4}$. Соответствующим образом меняется и емкость слоя. Например, емкость 500 Å слоя кремния возрастает в 10 раз при изменении V вблизи E_g/e на 0,1 В.

Таким образом, классические СР с указанными выше параметрами являются искусственными диэлектриками с реактивной сильно нелинейной проводимостью вплоть до частот субмиллиметрового диапазона. Поэтому они особенно перспективны для создания устройств, основанных на распределенном взаимодействии электромагнитных волн, таких как преобразователи частот и параметрические усилители, в этом диапазоне. Приведем результаты численных расчетов параметрических процессов $v\omega_1 = \omega_3 \pm \omega_2$ ($v = 1, 2, \dots$) в СР на основе слоев GaAs с $d = 250$ Å, $n = 10^{18}$ см⁻³, $T = 300$ К. В этой СР $E_*^{(1)} \approx 20$ кВ/см, длина затухания волны накачки с $\omega = 10^{12}$ с⁻¹ $z_3 \approx 2,3$ см. При амплитуде поля накачки $E_1 = E_*^{(1)}$ коэффициент параметрического усиления сигнала с $\omega_3 \sim 2 \cdot 10^{12}$ с⁻¹ на длине 0,6 см составляет 60 дБ. Того же порядка коэффициент преобразования сигнала ω_3 в низкую частоту $\omega_2 = 10^{11}$ с⁻¹ на длине z_3 . Коэффициент преобразования накачки в ее третью гармонику (за счет параметрической генерации с $v = 6$) на длине взаимодействия 1 см составляет десятки процентов.

Поскольку СР является сильно нелинейной реактивной средой со слабой дисперсией, то, заполняя ею бездисперсионную линию передачи, можно реализовать резкие перепады тока и напряжения с длительностью фронта $\sim 10^{-12}$ с, а при наличии специальной дисперсии — эффективную генерацию колебаний с периодом того же порядка. В частности, возможно эффективное преобразование видеоимпульса в радиоимпульс. Типичная картина приведена на рисунке для двух моментов безразмерного времени τ .

В классической СР под действием переменного напряжения с частотой $\omega \leq \tau_T^{-1} \gg \tau_r^{-1}$, $\omega \tau_D \ll 1$ и амплитудой, большей E_g/e , может быть создана инверсная населенность зон и реализовано индуцированное излучение на межзонных переходах. Такая возможность обусловлена более быстрым заполнением зоны проводимости электронами из валентной зоны за счет их



туннелирования, чем обратный процесс — освобождение ее, так как обратное туннелирование идет при меньших полях.

Таким образом, классические СР являются перспективными искусственными материалами для создания различных устройств электроники и оптоэлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велюантцев А. М., Игнатов А. А. — Sol. State Comm., 1977, v. 24, p. 817.
2. Романов Ю. А., Демидов Е. В. — ФТП, 1980, т. 14, с. 1526.
3. Демидов Е. В., Романов Ю. А. — ФТП, 1983, т. 17, с. 1674.
4. Белянцев А. М., Окомельков А. В. — ФТП, 1984, т. 18, вып. 7.
5. Белянцев А. М., Шашкин В. И. — Изв. вузов. Сер. «Радиофизика», 1982, т. 25, с. 833.