

(достигается в т. н. «гетеролазерах с квантовыми ямами»).

К. р. э. наблюдаются только в достаточно совершенных и однородных по толщине плёнках. Количественно это означает, что уширение уровней  $\delta\epsilon$  размерного квантования из-за рассеяния носителей заряда на примесях, фононах и шероховатостях поверхности плёнки должно быть мало по сравнению с энергетич. зазором  $\Delta\epsilon$  между уровнями, а флуктуации толщины должны быть малы по сравнению с длиной волны электрона на уровне Ферми  $\lambda_F$ . Осцилляции, обусловленные К. р. э., наиб. ярко проявляются в тонких плёнках ( $L \sim \lambda_F$ ) при низких темп-рах, когда тепловое «размытие»  $g(\epsilon)$  меньше  $\Delta\epsilon$  ( $kT \ll \Delta\epsilon$ , рис. 4). Указанным требованиям лучше всего удовлетворяют эпитаксиальные слои (типа слоёв GaAs в многослойных гетероструктурах), а также плёнки полуметаллов (Bi, Sn, Sb и их сплавы) и вырожденных полупроводников с узкой запрещённой зоной (InSb, PbTe) в интервале толщин  $L \sim 10^{-8} - 10^{-5}$  см. В металлич. плёнках из-за малости  $\lambda_F$  труднее выполнить требование однородности плёнок по толщине.

Плёнки и тонкие слои не единственные объекты ис-

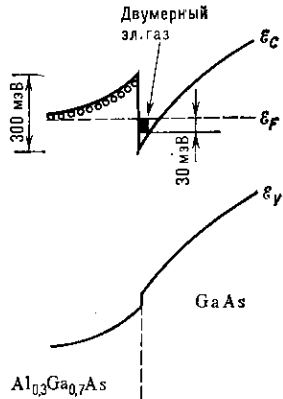


Рис. 7. Энергетическая диаграмма селективно-легированного гетероперехода.

следования К. р. э. Электроны или дырки в инверсионных и обогащённых слоях *МДП-структур* и селективно (модуляционно) легированных гетероструктур, электроны на поверхности жидкого He также обладают энергетич. спектром и плотностью состояний  $g(\epsilon)$  типа изображённых на рис. 3(б, в), хотя закон квантования  $p_z$  и вид  $\epsilon_n(0)$  отличаются от плёночных. Важное преимущество этих систем по сравнению с плёнками — возможность управления концентрацией носителей в широких пределах. Селективно легированные гетероструктуры, состоящие из переходов GaAs—Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, выращиваются, как правило, методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Слой или часть слоя Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As легируется (концентрация доноров  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>), а слой GaAs не легируется. Селективное легирование приводит к изгибу зон (рис. 7). Электроны, стремясь установить единый уровень Ферми в системе, переходят с доноров в потенц. яму, образованную изгибом зон, с одной стороны, и разрывом дна  $\epsilon_c$  зоны проводимости на гетеропереходе — с другой. Они могут свободно двигаться только вдоль границы гетероперехода. Квантование поперечного движения в яме (аналог размерного квантования в плёнке) приводит к образованию двумерного или квазидвумерного электронного газа с поверхностной концентрацией  $10^{11} - 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. В такой системе отсутствуют поверхностные состояния и дефекты (из-за соответствия решётки GaAs и Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As). Рассеяние на примесях из-за пространств. разделения электронов и породив-

ших их доноров мало. Подавление рассеяния приводит к высоким подвижностям электронов:  $\mu(4K) > 10^6$  см<sup>2</sup>/В·с,  $\mu(77K) \approx 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с,  $\mu(300K) \approx 10^4$  см<sup>2</sup>/В·с. Высокие значения  $\mu$  необходимы для обнаружения таких тонких физ. эффектов, как дробный квантовый Холла эффект, и важны для прикладных целей.

Так, *полевые транзисторы*, основанные на селективно легированных гетероструктурах с двумерным электронным газом, обладают большим быстродействием ( $\geq 10$  пс при  $T=77K-300K$ ). Прибор представляет собой гетероструктуру указанного типа, выращенную на полуизолирующей подложке GaAs (рис. 8). Напряжение  $V_{SD}$ , приложенное к стоку и истоку, создаёт ток в двумерной системе, к-рым можно управлять с помощью напряжения  $V_g$  на затворе. Эти приборы перспективны для создания сверхбыстродействующих интегральных схем.

Лит.: Тавгер Б. А., Демиковский В. Я. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых и полуметаллических плёнках, «УФП», 1968, т. 96, с. 61; Ли Ф. ш и И. М. и др., Явление осцилляций термодинамических и кинетических свойств плёнок твердых тел, «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1977, № 32, с. 3; Ромник Ю. Ф., Физика металлических плёнок. Размерные и структурные эффекты, М., 1979; Луцкий В. Н., Пинскер Т. Н., Размерное квантование, М., 1983; Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф., Электронные свойства двумерных систем, пер. с англ., М., 1985. В. А. Волков.

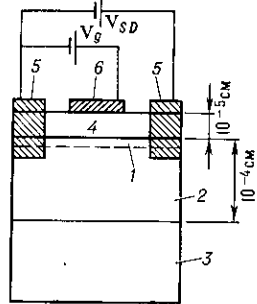


Рис. 8. Схема полевого транзистора: 1 — двумерный электронный газ; 2 — нелегированный GaAs; 3 — подложка из полуизолирующего GaAs; 4 — Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As (концентрация доноров  $N=7 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); 5 — сток и исток; 6 — затвор.

**КВАНТОВЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ** — устройства для получения эл.-магн. колебаний со стабильной во времени частотой. Среднеквадратичное относит. отклонение частоты (о т и о с и т е с т а б и л ь н о с т ь) и относит. погрешность воспроизведения действительного значения частоты (в о с п р о и з в о д и м о с т ь) К. с. ч. достигает  $10^{-14}$ . К. с. ч. — основа эталонов времени и длины, широко применяются в измерит. технике, навигации и метрологич. службе.

В К. с. ч. используются наиб. стабильные квантовые переходы между энергетич. уровнями атомов или молекул, частоты к-рых расположены в дециметровом или более коротковолновых диапазонах длин волн  $\lambda$ . Однако для большинства применений требуются высокостабильные колебания в радиодиапазоне, а для эталонов времени необходимы колебания с частотой 1 Гц, т. е. с периодом 1 с. Поэтому К. с. ч. содержат помимо устройства для наблюдения спектральной линии (квантового репера частоты) электронную схему преобразования частоты репера в др. частотные диапазоны.

**Типы К. с. ч.** По способу наблюдения спектральной линии в квантовом репере К. с. ч. подразделяются на активные и пассивные. Активный репер является квантовым генератором. Применяют активные К. с. ч. на водородном генераторе и рубидиевом генераторе с оптич. накачкой (рис. 1).

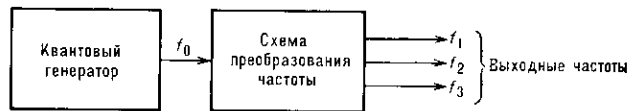


Рис. 1. Блок-схема активного квантового стандарта частоты.

В пассивном репере спектральная линия атомов используется для автоподстройки по ней частоты вспомогат. генератора. В этом случае квантовый репер работает как дискриминатор, определяющий величину и знак отклонения частоты вспомогат. генератора от её номинального значения и устраняющий это отклонение. В применяемых пассивных К. с. ч. реперные спектральные линии лежат в сантиметровом диапазоне  $\lambda$ . При этом вспомогат. генератором служит *кварцевый генератор*, а электронная схема обеспечивает необходимое преобразование его частоты, наблюдение спектральной линии и автоподстройку по ней кварцевого генератора (рис. 2). Основой пассивных К. с. ч. является входящая в состав репера поглощающая ячейка, в к-рой атомы, максимально изолированы