

полем. В полевых транзисторах поле создается путем подачи смещения на затвор. Встроенное поле можно создать на границе двух полупроводников с различными величинами запрещенных зон – на гетеропереходе.

Теоретически подобные ситуации, когда возникает ограничение в движении электронов в одном направлении, начали рассматривать в 30-е годы 20 столетия. Как это ни странно, проблема проводимости двумерного электронного газа сводится к довольно простой задаче о движении частицы в одномерной потенциальной яме, которая решалась уже в первых учебниках квантовой механики.

Более детальные исследования были выполнены в 50-х годах рядом авторов, в числе которых известный советский теоретик И. М. Лившиц. Они проводили теоретические исследования тонких металлических пленок.

Экспериментальные доказательства возникновения двумерного электронного газа при уменьшении толщины металлических пленок впервые были получены в работах советских исследователей В. Н. Луцкого, Д. Н. Корнеева, М. И. Елинсона и Ю. Ф. Огриня. Одновременно американские исследователи А. Фаулер, Ф. Фэнг, У. Ховард и П. Стайлс обнаружили двумерный газ в инверсионном канале кремниевых МДП-транзисторов.

Одной из причин, по которой следует перспективность исследования свойств двумерного газа заключается в том, что как показали дальнейшие исследования, подвижность электронов в нем заметно превышает подвижность в монокристаллах. Например, этот параметр превышает подвижность электронов в монокристаллах GaAs более, чем на порядок. Длина свободного пробега электронов достигает нескольких сотен нанометров. Это позволяет значительно увеличить рабочие частоты полупроводниковых приборов, прежде всего транзисторов. Высокая подвижность электронов объясняется их малой эффективной массой, а также тем, что в тонкую область, где формируется двумерный газ, практически не попадает примесных атомов, являющихся центрами рассеяния электронов.

Л. Есаки и Р. Тсу в 1969 г. предложили гетероструктуру AlGaAs–GaAs. В ней на приграничной области AlGaAs образуется положительный заряд за счет ионизированных атомов Si, введенных предварительно на расстояние в несколько десятков нанометров от границы. На этом расстоянии располагается легированная область AlGaAs, называемая спейсером. Электроны мигрируют из легированной области в GaAs. Они скапливаются в приграничной области GaAs, формируя отрицательный заряд, за счет их притяжения к отмеченному положительному заряду. На дне зоны проводимости GaAs, у которого запрещенная зона более узкая, чем у AlGaAs, образуется двухмерный электронный газ. Ширина этой области не превышает 70 нм. Таким образом осуществляется разделение в пространстве ионизированной примеси Si с двумерным электронным газом. Подобная структура используется в транзисторах с высокой подвижностью электронов (так называемых НЕМТ). В них с внешней стороны AlGaAs наносится металлический контакт (затвор), а внешняя область GaAs с высоким удельным сопротивлением легируется кремнием.

Литература

1. Андо, Т. Электронные свойства двумерных систем / Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн. – М.: Мир, 1985. – 416 с.
2. Пожела, Ю. Физика быстродействующих транзисторов. – Вильнюс: Мокслас, 1989. – 264 с.
3. Шур, М. Современные приборы на основе арсенида галлия. – М.: Мир, 1991. – 632 с.

УДК 531

ОСОБЕННОСТИ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ ПРИ СЛОЖЕНИИ ВОЛН С РАЗЛИЧНЫМИ АМПЛИТУДАМИ

Студент гр. 10301223 Поддубный А. В

Кандидат физ.-мат. наук, доцент Бобученко Д. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Существует множество устройств, в основе которых лежат свойства стоячих волн. Стоячие волны образуются в результате наложения двух или нескольких встречных бегущих волн одинаковой частоты. В литературе по общей физике [1; 2] рассматривается наложение волн с одинаковыми амплитудами. Но, ясно, что реально при отражении часть энергии падающей

волны поглощается и амплитуда отраженной волны становится меньше падающей, при сложении таких волн также образуется стоячая волна, которая частично переносит энергию.

В работе рассмотрены особенности стоячей волны при сложении волн, распространяющихся друг навстречу другу, с разными амплитудами. Уравнения бегущих волн:

$$S_1 = A_1 \cos(\omega t - kx), \quad S_2 = A_2 \cos(\omega t + kx),$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ – длина волны. При сложении этих волн возникнет гармоническая волна: $S = S_1 + S_2 = A \cos(\omega t - \varphi_0)$. Формулы для амплитуды A и для фазы φ_0 получаются, если разложить косинусы:

$$\begin{aligned} A_1 \cos \omega t \cos kx + A_1 \sin \omega t \sin kx + A_2 \cos \omega t \cos kx - A_2 \sin \omega t \sin kx = \\ = A \cos \omega t \cos \varphi_0 + A \sin \omega t \sin \varphi_0. \end{aligned}$$

Из-за произвольности рассматриваемого времени t для справедливости этого равенства необходимо, чтобы слагаемые при $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ были одинаковы. В результате, получим систему из двух уравнений:

$$(A_1 + A_2) \cos kx = A \cos \varphi_0, \quad (A_1 - A_2) \sin kx = A \sin \varphi_0.$$

Возведя в квадрат и сложив, получим формулу для амплитуды, разделив второе на первое – формулу для начальной фазы результирующей волны:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}x\right)}, \quad \tan \varphi_0 = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right).$$

Следовательно, уравнение стоячей волны, полученной в результате сложения двух встречных волн одинаковой частоты и различными амплитудами имеет вид:

$$S = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}x\right)} \cos\left(\omega t - \operatorname{atan}\left(\frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right)\right).$$

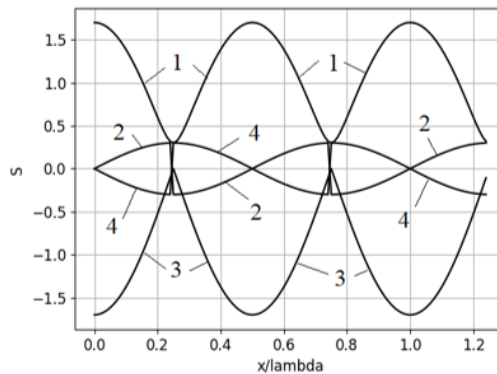


Рис. 1. Зависимости стоячей волны

Амплитуда и фаза волны зависят от координаты x . Графики стоячей волны, при $A_1 = 1,0$, $A_2 = 0,7$, для амплитуды (1), колебаний в различные моменты времени (2 – при $t = 0,25T$; 3 – $t = 0,5T$; 4 – при $t = 0,75T$, где T – период колебаний) от относительной координаты $\frac{x}{\lambda}$ представлены на рисунке. В точках среды, где амплитуда максимальна (пучность) $x_m = \pm m \frac{\lambda}{2}$, амплитуда равна $(A_1 + A_2)$, а точках среды, где амплитуда минимальна (узлы) $x_m = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{4}$, амплитуда равна $(A_1 - A_2)$. Таким образом, в рассмотренной стоячей волне в узлах амплитуда не равна нулю, и фаза волны зависит от координаты.

Литература

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. / Д. В. Сивухин. – 5-е изд. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – Т. 3: Электричество. – 656 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 1: учебное пособие для втузов / И. В. Савельев. – М.: АСТ Астрель, 2006. – 336 с.