

# ЯДЕРНАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ИЗОТОПИЧЕСКИ-СМЕШАННЫХ СТРУКТУР

**И**спользование ядерной технологии нейтронного облучения изотопически-смешанных материалов позволило создать новое направление науки низкоразмерных структур, названное авторами изотоптроикой. Направление находится на стыке ядерной физики, квантовой механики, материаловедения изотопически-смешанных веществ, квантовой информации. Основная цель изотоптроики – исследование и создание изотопически-смешанных квантовых структур, применяемых для передачи и обработки информации и использующих зависимость микрофизических свойств от массы кристаллообразующих частиц.

Среди наиболее перспективных направлений нанoeлектроники важное место занимает создание низкоразмерных структур, имеющих широчайшее применение – от оптических волноводов, лазеров, фотодетекторов до ячеек памяти и вычислительных гейтов. Это структуры, у которых один размер – квантовая яма, два – квантовая проволока, три размера – квантовые точки соизмеримы с длиной волны де Бройля для электрона  $\lambda_b = h/p$  ( $h$  – постоянная Планка,  $p$  – импульс) в твердом теле. Величина  $\lambda_b$  характеризует волновой процесс движущейся частицы с  $p = m^*v$  ( $m^*$  – эффективная масса частицы,  $v$  – скорость ее движения). Довольно часто имеет место состояние, когда  $m^* \ll m_0$ , где  $m_0$  – масса электрона в вакууме. Чем больше разница масс, тем сильнее проявляются квантовые эффекты в низкоразмерных структурах (НС). Современная литографическая техника позволяет сравнительно легко создавать полупроводниковые наноструктуры, размеры которых в одном или двух измерениях меньше  $\lambda_b$  [1]. Однако изготовление квантовых точек сопряжено с большими трудностями, связанными с необходимостью обеспечения высокой точности в трехмерном пространстве, что требует новых технологических решений.

Особенности квантовых эффектов в НС объясняются тем, что поведение частиц в них подчиняется законам квантовой механики, а именно, уравнению Шредингера. При взаимо-

действию свободного электрона с любым дефектом вещества может происходить изменение энергии и импульса, а также фазы его волновой функции. Длина фазовой когерентности  $l_\phi$  определяется как расстояние, проходимое электроном без изменения фазы. Понятно, что интерференционные эффекты волн, описываемые уравнением Шредингера, могут наблюдаться только при движении частиц на расстояния порядка или меньше  $l_\phi$ . Искусственно формируемые дефекты внутри полупроводника играют в этом случае существенную роль в создании квантовых эффектов. Такими дефектами могут быть гетеропереходы (переходы между слоями полупроводника), имеющие разные величины запрещенных зон  $E_g$ . Разница значений запрещенных зон  $\Delta E_g$  обычно имеет порядок  $10^{-1}$  эВ. Если энергия электрона  $E_e < \Delta E_g$ , то он удерживается

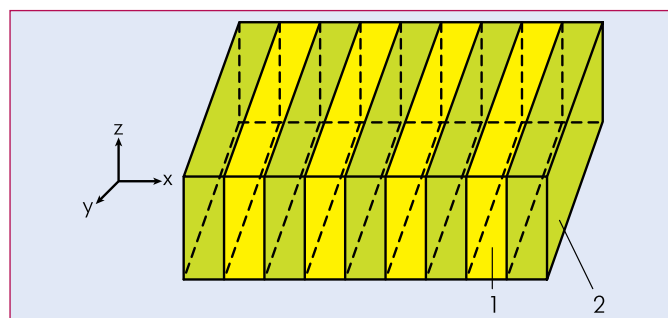


Рис. 1 Квантовые ямы

в связанном состоянии внутри, например, квантовой ямы, создаваемой на стыке двух разных полупроводников. Из решений уравнения Шредингера для волновых функций электрона в одномерной потенциальной яме вытекает очень важный вывод – всегда можно найти, по крайней мере, одно связанное состояние, независимо от того, насколько мало значение  $\Delta E_3$  [2]. Этот вывод позволяет утверждать, что аналогичные "гетеропереходы" можно формировать из слоев одного и того же вещества, но состоящих из разных изотопов, например, кремния  $Si^{29}$  и  $Si^{30}$ , имеющих разную величину запрещенной зоны и значение  $\Delta E_3$  порядка 1 мэВ [3]. Удержание электрона внутри низкоразмерной структуры можно использовать для возбуждения экситонов (нейтральных квазичастиц, состоящих из электрона и дырки), которые применяются в оптоэлектронных устройствах обработки информации. По мере уменьшения ширины квантовой ямы, экситоны постепенно сжимаются, энергия связи квазичастиц увеличивается и условия их возбуждения упрощаются. Следовательно, совершенствование технологии производства НС значительно повысит эффективность работы оптических приборов.

На рис.1 изображены одномерные низкоразмерные структуры в виде чередования слоев из разных изотопов по шири-

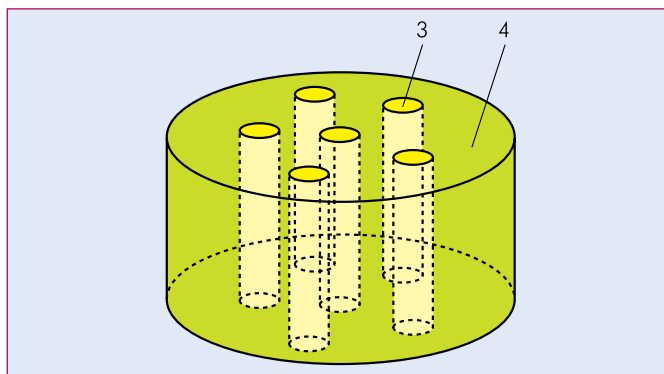


Рис.2 Квантовые проволоки

не от нескольких десятков до единиц нм, где 1 – слой из  $Si^{29}$ , 2 – слой из  $Si^{28}$  или  $Si^{30}$ .

На рис.2 представлены двумерные НС в виде цилиндров 3 из  $Si^{29}$  и основы 4 из  $Si^{28}$  или  $Si^{30}$ .

На рис.3 показана трехмерная НС в виде квантовой точки 5 из  $Si^{29}$ , окруженной слоями 6 из  $Si^{28}$  или  $Si^{30}$ .

Реальные квантовые структуры не могут быть избавлены от дисперсии размеров и других дефектов. Это связано с тем, что технология их создания не очень развита, и используемые в промышленном производстве методы литографии и эпитаксии не позволяют пока преодолеть рубеж в 45 нм [1].

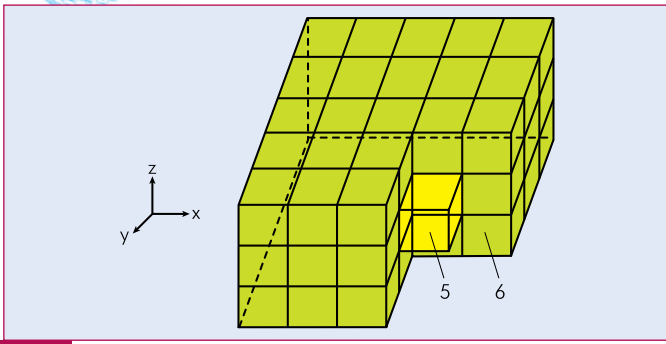


Рис.3 Квантовая точка

В последние два десятилетия получили развитие исследования свойств материалов разного изотопического состава [3, 4], создавшие предпосылки для практического применения изотопически-смешанных материалов в области нанотехнологий.

Технологии изготовления современных оптических устройств с помощью ядерных реакций давно применяются в мире. Так, современные ядерные технологии получили широкое развитие в России и за рубежом для производства интегральных схем оптоэлектроники [5].

Эти технологии можно с успехом применять и для производства низкоразмерных оптических приборов. Особенно актуальна ядерная технология для изготовления трехмерных квантовых структур, где точность размеров должна быть порядка нескольких нанометров.

Изготовление оптического волокна с помощью ядерной технологии описано в [6]. В основе способа лежит реакция поглощения нейтронов ядрами вещества, которая позволяет изменять массу его изотопов и оптические характеристики, а также получать эффект полного внутреннего отражения.

На рис.4 представлена возможная схема облучения заготовки тепловыми нейтронами, где 7 – формируемые в результате поглощения нейтронов слои из  $Si^{29}$ , 8 – основа заготовки из  $Si^{28}$ .

Ядерные технологии могут быть с успехом использованы для производства квантовых структур на основе изотопически-смешанных материалов, например кристаллов различных изотопов кремния, характеристики которых (величина энергии связи возбуждаемых экситонов, энергия межзонных переходов  $E_g$  и т.д.) зависят от массы изотопов [3,4].

Именно различия электронных характеристик материалов, состоящих из изотопов с разным числом нейтронов в ядре,

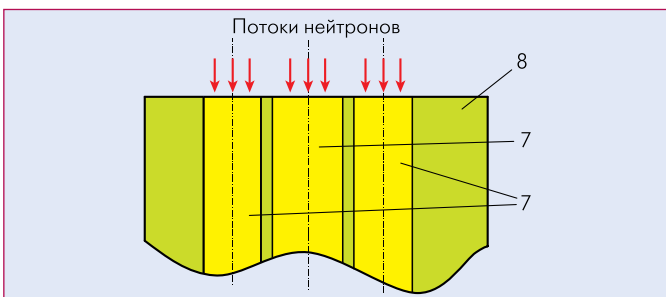


Рис.4 Схема облучения заготовки

и возможность получения с помощью нейтронного облучения вещества с разным изотопическим составом позволяют создавать исследуемые в изотоптронике принципиально новые квантовые структуры (см. рис.1–3). К ним относятся лазеры, фотоприемники, оптические процессоры, ячейки памяти, фотонно-кристаллические волокна, различные оптические датчики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнология в электронике. – М.: Техносфера, 2005.
2. Мартинес-Дуарт Дж., Мартин-Рueda Р.Дж. Нанотехнология для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2007.
3. Tsoi S., Rodriguez S., Ramdas A.K. Isotopic dependence of the  $E_0^1$  and  $E_1$  direct gaps in the electronic band structure of Si. PHYSIKAL REVIEW B 72, 153203 (2005).
4. Ramdas A.K., Rodrigues S., Tsoi S., Haller E.E. Electronic band gaps of semiconductors as influenced by their isotopic composition. Solid State Communication 133 (2005) 709–714.
5. Plekhanov V.G. Review Application of isotope effects in solids. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 38 (2003) 3341–3429.
6. Журавлева Л.М., Плеханов В.Г. Нанотехнология оптических устройств передачи и обработки информации. Материалы международной конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2009", Владимир-Суздаль, 21–22 мая 2009.

## СПИСОК РЕКЛАМОДАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА "НАНОИНДУСТРИЯ" 4/2009

Interactive Corporation .....	71
INTERTECH Corporation .....	63
NTMEX.....	27
АБС-Сервис.....	37
АРУАЛ-Тех.....	19
Вакуумтехэкспо.....	69
Дассо Системз Раша Корп .....	25
Изделия двойного назначения.....	87
КомпозитЭкспо .....	65
Криогенэкспо .....	58
Криосистемы .....	2
Кристал Кубань .....	15
ЛабораторияЭкспо-2009 .....	29
ЛАБТЕСТ.....	57
М+В Цандер Фэсилити Инжиниринг.....	21
Микротехнологии .....	85
Научное и технологическое оборудование.....	II обл.
НИИТМ.....	11
НИИФИ .....	35
НИЦПВ.....	39, 41
НПП Технология .....	17, I обл.
НТ-МДТ .....	III обл.
Оптэк, ООО .....	31
Роснанотех .....	IV обл.
Сибур.....	33
Солар ТИИ.....	73
СПБГЭТУ.....	81
ТИСНУМ, ФГУ .....	43
Химия-2009 .....	59
Центр специальной одежды .....	9
ЦПТ.....	1
ЭкспоЭлектроника.....	49
ЭлектронТехЭкспо.....	53