

ЯДЕРНАЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ИЗОТОПИЧЕСКИ-СМЕШАННЫХ СТРУКТУР

Использование ядерной технологии нейтронного облучения изотопически-смешанных материалов позволило создать новое направление науки низкоразмерных структур, названное авторами изотоптроникой. Направление находится на стыке ядерной физики, квантовой механики, материаловедения изотопически-смешанных веществ, квантовой информации. Основная цель изотоптроны – 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 наноэлектроники 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 Броиля для электрона $\lambda_b = h/p$ (h – постоянная Планка, p – импульс) в твердом теле. Величина λ_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 полупроводниковыеnanoструктуры, размеры которых в одном или двух измерениях меньше λ_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-

действии свободного электрона с любым дефектом вещества может происходить изменение энергии и импульса, а также фазы его волновой функции. Длина фазовой когерентности l_ϕ 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_ϕ . 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_3 . Разница значений запрещенных зон ΔE_3 обычно имеет порядок 10^{-1} эВ. Если энергия электрона $E_3 < \Delta E_3$, то он удерживается

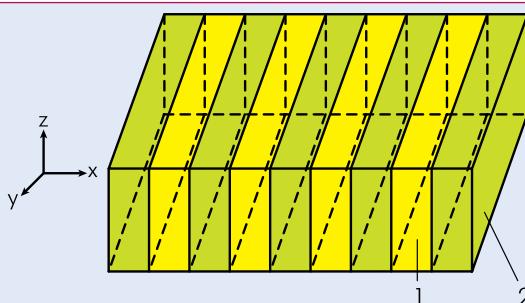


Рис.1 Квантовые ямы

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 ΔE_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 ΔE_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 ширине от нескольких десятков до единиц нм, где 1 – слои из Si^{29} , 2 – слои из Si^{28} или Si^{30} .

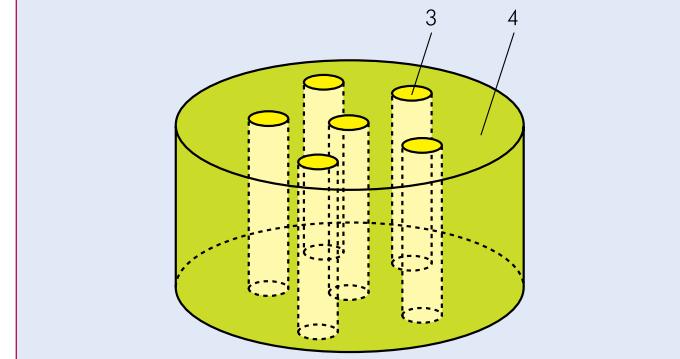


Рис.2 Квантовые проволоки

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].

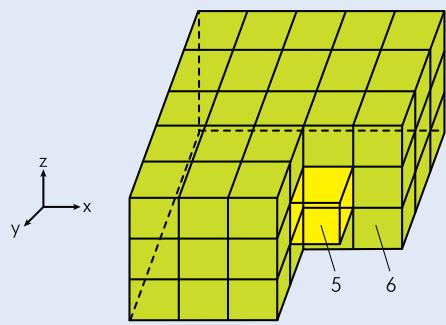


Рис.3 Квантовая точка

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_3 и т.д.) зависят от массы изотопов [3,4].

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

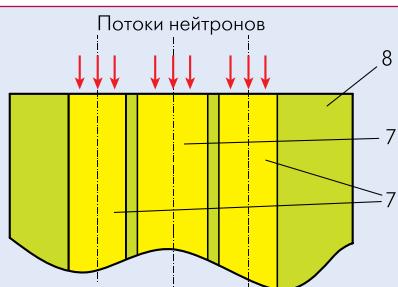


Рис.4 Схема облучения заготовки

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, фото-приемники, оптические процессоры, ячейки памяти, фотонно-кристаллические волокна, различные оптические датчики.

ЛИТЕРАТУРА

- Чаплыгин Ю.А. Нанотехнология в электронике. – М.: Техносфера, 2005.
- Мартинес-Дуарт Дж., Мартин-Руеда Р.Дж. Нанотехнология для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2007.
- 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).
- 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.
- Plekhanov V.G. Review Application of isotope effects in solids. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 38 (2003) 3341–3429.
- 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-Сузdal, 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 Раши Корп	25
Изделия двойного назначение.....	87
КомпозитЭкспо	65
Криогенэкспо.....	58
Криосистемы	2
Кристал Кубань	15
ЛабораторияЭкспо-2009	29
ЛАБТЕСТ.....	57
М+В Цандер Фэслилити 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