

Расщепление частот оптических фононов в растянутых слоях германия

В. А. Володин^{+*1)}, В. А. Тимофеев⁺, А. Р. Туктамышев^{+*}, А. И. Никифоров⁺

⁺Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

^{*}Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 16 января 2017 г.

После переработки 30 января 2017 г.

Растянутые пленки германия в многослойных гетероструктурах Ge/GeSn/Si/GeSnSi, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках Si(001), исследованы с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света. Двуосные деформации растяжения в пленках достигали 1.5%, что превысило значения, полученные ранее для данной системы. Экспериментально обнаружено расщепление частот длинноволновых оптических фононов, т.е. вызванный двуосными растяжениями сдвиг частоты синглета, как и предсказывают расчеты, больше сдвига частоты дублета. Обнаружен также индуцированный деформациями сдвиг пиков комбинационного рассеяния света от двухфононного рассеяния в германии.

DOI: 10.7868/S0370274X17050101

Одним из способов управления зонной структурой полупроводников является упругая деформация [1, 2]. В работе [3] теоретически показано, что двуосные растягивающие напряжения в германии увеличивают подвижность как электронов, так и дырок. Относительно небольшая разница в энергии (0.14 эВ) между прямыми и непрямыми переходами в Ge дает надежду на создание прямозонного деформированного германия для создания светоизлучающих структур с хорошей квантовой эффективностью. Теоретические расчеты предсказывают уменьшение энергии Г-долины в зоне проводимости и превращение Ge в прямозонный материал при его двуосном растяжении на $\sim 2\%$ [4–6]. Кимерлинг с соавторами сообщил о сверхлинейном увеличении мощности излучения от накачки (лазерный эффект) в растянутых пленках германия *n*-типа [7]. Выращивание пленок на искусственной подложке с несопадающим параметром кристаллической решетки является одним из путей получения сильно деформированных материалов. В многослойных гетероструктурах InGaAs/Ge/InGaAs деформация растяжения в пленках Ge в плоскости роста достигает 2.33% [8–10]. В этом случае, если параметр подложки больше параметра деформируемого материала, а толщина выращиваемого слоя не превосходит критической, пленка остается псевдоморфной и является двухосно растянутой. Для выращивания растянутых слоев

Ge и GeSn в качестве искусственной подложки использованы также гетероструктуры, в которых на подложке Si выращивались релаксированные буферные слои $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ [11–15]. Однако вследствие ограниченной растворимости Sn в Ge, двуосные деформации растяжения Ge в такой системе обычно не превышают 1.1%. Следует отметить, что применение буферных слоев $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ позволяет осуществлять рост на подложке из Si, а значит, технология совместима с традиционной кремниевой технологией, в отличие от подхода с применением буферных слоев InGaAs.

Изменение оптических свойств растянутых пленок германия в таких структурах анализировалось из данных спектроскопии фотолюминесценции [16–18]. В работе [19] был обнаружен длинноволновый сдвиг края поглощения таких пленок с применением метода спектроскопии пропускания света. Комбинационное рассеяние света является эффективным инструментом исследования механических деформаций в пленках полупроводников и их твердых растворов [20–22]. Известно, что двуосные механические напряжения приводят к расщеплению трижды вырожденного длинноволнового оптического фонона в Si или Ge на синглет и дублет [20, 21]. Для обратного рассеяния от поверхности Si(111), в соответствии с правилами отбора разрешены и синглет и дублет, что позволило наблюдать их расщепление экспериментально [21]. Экспериментальные попытки исследовать это расщепление для пле-

¹⁾e-mail: volodin@isp.nsc.ru