

03,09

Дифференциальный анализ спектров краевой фотолюминесценции монокристаллов Ge различных ориентаций в условиях двухосных растягивающих напряжений

© А.М. Емельянов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Emelyanov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 10 сентября 2015 г.)

С использованием предложенного автором дифференциального метода анализа спектров люминесценции полупроводников проведен анализ опубликованных ранее спектров фотолюминесценции объемных монокристаллов германия ориентаций (100), (110) и (111) при различных двухосных механических растягивающих напряжениях. С ростом напряжений для всех ориентаций происходит обусловленное сужением прямой запрещенной зоны Ge смещение максимумов дифференциальных спектров в области прямых излучательных переходов в сторону меньших энергий квантов. При этом максимумы дифференциальных спектров в области непрямых излучательных переходов практически не смещаются. Это указывает на независимость ширины непрямой зоны Ge от растягивающих напряжений, по крайней мере при их величинах до $\sim 0.2\text{--}0.3\%$.

1. Введение

Монокристаллический германий относится к непрямозонным полупроводникам, но имеет и прямую зону, расположенную на 0.136 eV [1–3] выше непрямой. Часть электронов из непрямой зоны (L -долины) термически может быть заброшена в прямую (Γ -долину), где они с большой вероятностью могут рекомбинировать с дырками излучательно. Можно уменьшить энергетический зазор между дном непрямой зоны проводимости и дном прямой зоны германия, создавая в нем механические напряжения [4–7]. Это способствует значительному увеличению интенсивности прямой излучательной рекомбинации. Повышение концентрации свободных электронов в n -Ge также способствует значительному увеличению интенсивности прямой излучательной рекомбинации [1]. В работе [6] предложено обоснование возможности получения лазерного эффекта на прямых переходах в германии. Применение указанных выше приемов позволило авторам [7] изготовить германиевую структуру на кремнии, в которой при оптической накачке наблюдался лазерный эффект. Количественные изменения ширины запрещенных зон монокристаллов германия различных ориентаций в зависимости от величин двухосных механических растягивающих напряжений исследовались в работах [4,5]. Для этих целей измерялись спектры краевой (в области края фундаментального поглощения) фотолюминесценции (ФЛ) монокристаллов Ge различных ориентаций. Для определения изменений ширины запрещенных зон полупроводников на основе измерений спектров краевой люминесценции необходимо достаточно точно измерять энергии квантов, относящихся к порогам пиков краевой ФЛ. В работах [8–10] на примере непрямых переходов в монокристаллическом Si было показано, что наиболее точно определять пороговые

энергии пиков краевой люминесценции позволяет дифференциальный метод анализа спектров люминесценции.

Целью настоящей работы является получение с помощью дифференциального метода информации об изменениях при комнатной температуре положений максимумов производных спектров краевой ФЛ и связанных с ними ширины запрещенных зон монокристаллов германия различных ориентаций под влиянием механических двухосных растягивающих напряжений, а также сравнение соответствующих изменений запрещенных зон Ge с полученными другими методами.

2. Условия проведения исследований

Представленные в настоящей работе исследования по сути являются продолжением исследований, опубликованных в [4,5], но с использованием более совершенного и информативного метода анализа, чем в [4,5]. Многочисленные спектры ФЛ, которые были получены при комнатной температуре в [4,5], в настоящей работе были отсканированы, оцифрованы и затем продифференцированы с помощью программного и технического обеспечения, позволявшего, согласно [10], ранее воспроизводить положения максимумов производных оригиналов спектров электролюминесценции монокристаллического кремния с погрешностью менее 1 meV . На опубликованных в [4,5] оригинальных спектрах в области энергий квантов $\sim 0.65\text{--}0.69\text{ eV}$ наблюдались небольшие резкие изломы, которые могут обуславливать проявления максимумов производных, не связанных с порогами пиков спектров люминесценции, а обусловленных полосами поглощения или рассеяния света для атмосферного воздуха. Наиболее вероятно, что эти полосы относятся к парам воды. Поэтому при дальнейшем рассмотрении исключена область энергий квантов $\sim 0.65\text{--}0.69\text{ eV}$.

Анализируются измеренные при комнатной температуре и различных двухосных растягивающих напряжениях (biaxial tensile strain) спектры ФЛ из работы [4] для *n*-Ge (110) с удельным сопротивлением 0.3–0.6 Ω·см (образец № 1) и для *p*-Ge (111) с удельным сопротивлением 0.01–0.2 Ω·см (образец № 2). Для возбуждения ФЛ в этой работе использовался лазер с длиной волны 671 nm и мощностью 360 mW. Другие экспериментальные условия и оригинальные спектры представлены в [4].

Анализируются также измеренные при комнатной температуре и различных двухосных растягивающих напряжениях спектры ФЛ из работы [5] для объемного *n*-Ge (100) (образец № 3). Для возбуждения ФЛ в этой работе также использовался лазер с длиной волны 671 nm и мощностью 360 mW. Другие экспериментальные условия и оригинальные спектры приведены в [5].

3. Результаты исследований

Полученные при различных двухосных механических растягивающих напряжениях и комнатных температурах дифференциальные спектры краевой ФЛ образцов № 1, 2 и 3 представлены на рис. 1–3. На всех спектрах присутствует по два максимума производных dI_{PL}/dE интенсивности I_{PL} ФЛ в исследованной области энергий квантов E . Максимум в более коротковолновой области спектра (E_d) относится к прямым излучательным переходам, а в более длинноволновой (E_{ind}) — к непрямым. На всех графиках с ростом механических напряжений E_d смещается в область меньших энергий квантов, а E_{ind}

в пределах погрешности дифференциального метода не меняется. Последний результат принципиально отличается от результатов исследований авторов [4,5], согласно которым с ростом напряжений изменяется не только ширина прямой запрещенной зоны, но и ширина непрямо запрещенной зоны германия. Это различие, вероятно, связано с большими погрешностями определения в работах [4,5] порогов пиков спектров краевой ФЛ Ge в

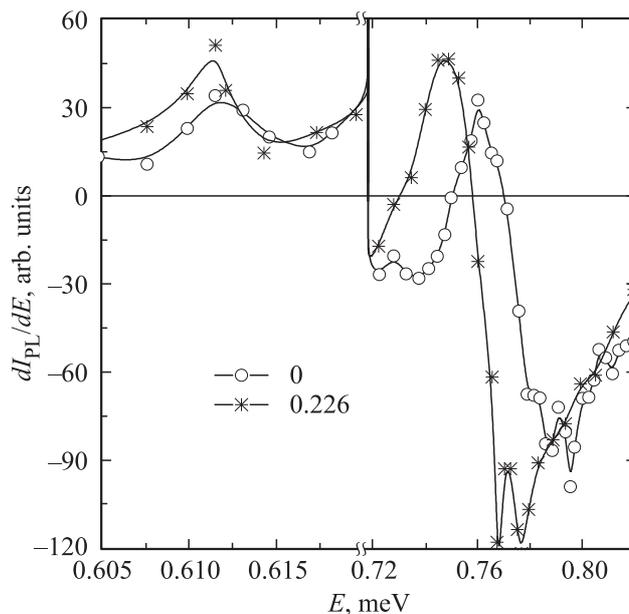


Рис. 2. Дифференциальные спектры для образца № 2 при различных двухосных растягивающих напряжениях (указаны в %).

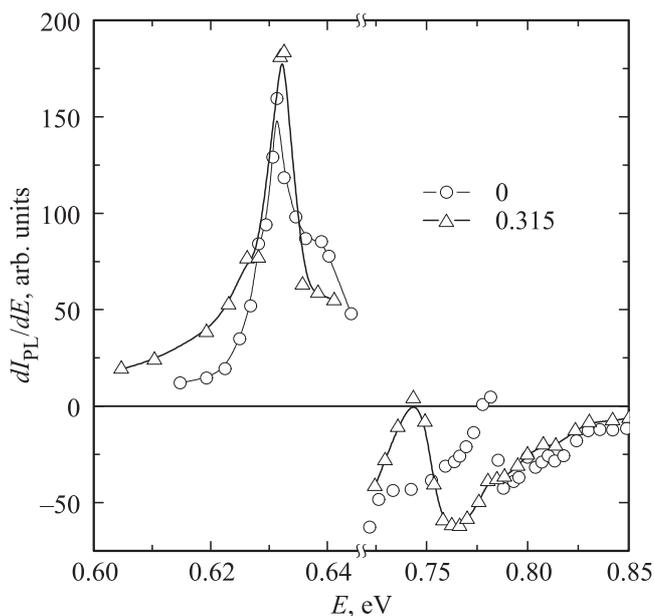


Рис. 1. Дифференциальные спектры для образца № 1 при различных двухосных растягивающих напряжениях (указаны в %).

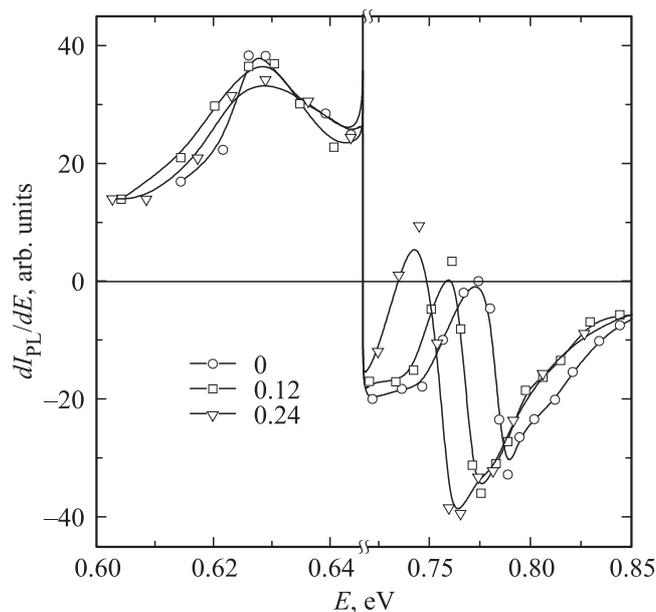


Рис. 3. Дифференциальные спектры для образца № 3 при различных двухосных растягивающих напряжениях (указаны в %).

области непрямых переходов. В частности, как следует из результатов применения дифференциального метода к спектрам неяркой краевой люминесценции монокристаллического кремния [8,10], дифференциальный метод обычно практически не чувствителен к хвостам плотности состояний в запрещенной зоне. А в работах [4,5] влияние хвостов состояний для использовавшихся методов анализа спектров краевой ФЛ не рассматривалось.

На рис. 4 показаны зависимости от величины двухосных растягивающих напряжений положений максимумов производных спектров краевой ФЛ в области прямых и непрямых переходов для образцов № 1–3. Различие положений максимумов производных спектров для разных образцов при отсутствии напряжений может быть объяснено различным уровнем легирования Ge. Отметим значительно меньшее влияние на E_d величины напряжений для образца № 2. К сожалению, этот образец значительно отличался от двух других не только ориентацией, но и уровнем легирования. Поэтому назвать одну причину такого отличия не представлялось возможным.

В работе [4] исследовались зависимости разностей изменений ширин запрещенных зон для прямых и непрямых переходов ($\Delta E_{c\Gamma} - \Delta E_{cL}$) от величины механических напряжений при двухосном растяжении образцов Ge различной ориентации. Авторы [4] указывают на изменение с ростом напряжений ширины за-

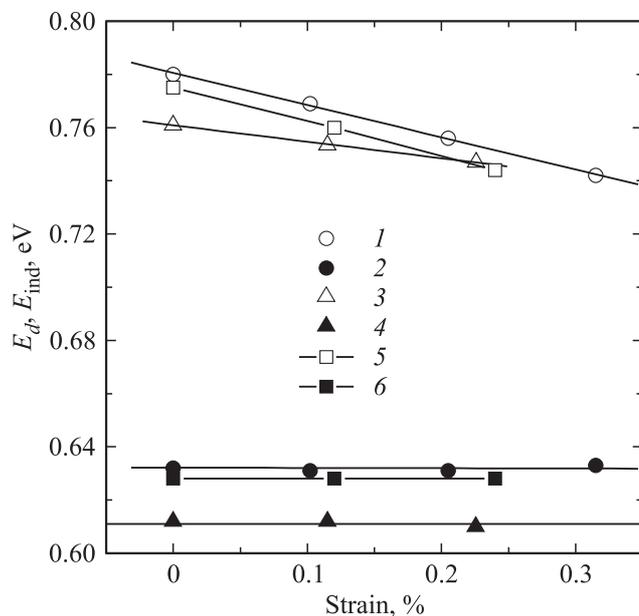


Рис. 4. Зависимости положений максимумов дифференциальных спектров для монокристаллов Ge различных ориентаций от величины двухосных растягивающих напряжений. E_d (зависимости 1, 3, 5) — энергии квантов, соответствующие максимумам в области прямых излучательных переходов, E_{ind} (зависимости 2, 4, 6) — энергии квантов, соответствующие максимумам в области непрямых излучательных переходов. 1, 2 — для образца № 1; 3, 4 — для образца № 2; 5, 6 — для образца № 3.

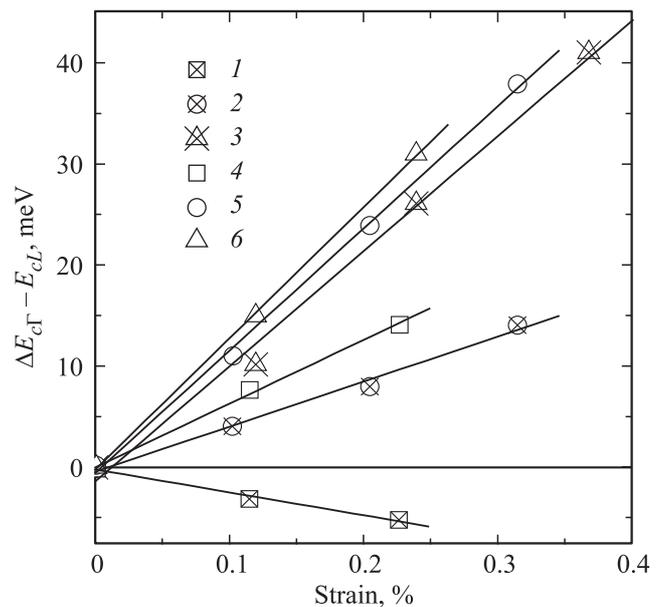


Рис. 5. Зависимости величин $\Delta E_{c\Gamma} - \Delta E_{cL}$ от двухосных растягивающих напряжений по результатам работ [4,5] (1–3) и по результатам исследований с применением дифференциального метода (4–6). 1, 4 — для образца № 2; 2, 5 — для образца № 1; 3, 6 — для образца № 3.

прещенной зоны как для прямых излучательных переходов ($\Delta E_{c\Gamma} = E_{c\Gamma,r} - E_{c\Gamma,s}$), так и для непрямых ($\Delta E_{cL} = E_{cL,r} - E_{cL,s}$). Индексы r и s относятся соответственно к ширинам запрещенных зон (обозначенных индексами Γ и L) в отсутствие и при наличии механических напряжений. При этом с ростом напряжений по результатам экспериментов и расчетов авторов [4] для образцов № 1 и 3 величина $\Delta E_{c\Gamma} - \Delta E_{cL}$ растет в сторону положительных, а для образца № 2 — в сторону отрицательных значений (рис. 5). Но проведенный в настоящей работе дифференциальный анализ спектров этих образцов (рис. 5) показал, что с ростом механических напряжений для всех образцов определенные по положениям максимумов пиков дифференциальных спектров величины $\Delta E_{c\Gamma} - \Delta E_{cL}$ увеличиваются только в сторону положительных значений. Причины отличия результатов, полученных с использованием дифференциального метода, от ранее опубликованных (как знака изменения, так и самих величин $\Delta E_{c\Gamma} - \Delta E_{cL}$) заключаются в недостаточно точном определении в предшествующих исследованиях порогов основных пиков ФЛ, прежде всего в области непрямых переходов.

4. Заключение

В работе впервые с использованием дифференциального метода анализа спектров краевой ФЛ монокристаллов германия различных ориентаций исследованы изменения пороговых энергий пиков спектров в области прямых и непрямых излучательных переходов в

результате приложения двухосных растягивающих напряжений. Принципиальным отличием от результатов ранее опубликованных исследований в этой области является доказательство практически полного отсутствия изменений ширины непрямой запрещенной зоны Ge в зависимости от величины механических напряжений, по крайней мере до величин напряжений порядка нескольких десятых долей процента.

Список литературы

- [1] M. El Kurdi, T. Kociniowski, T.-P. Ngo, J. Boulmer, D. Débarre, P. Boucaud, J.F. Damlencourt, O. Kermarrec, D. Bensahel. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 191 107 (2009).
- [2] E. Kasper, M. Oehme, T. Arguirov, J. Werher, M. Kittler, J. Schulze. *Adv. OptoElectron.* **2012**, 916 275 (2012).
- [3] X. Sun, J. Liu, L.C. Kimerling, J. Michel. *Opt. Lett. Opt. Lett.* **34**, 1198 (2009).
- [4] H.-S. Lan, S.-T. Chan, T.-H. Cheng, C.-Y. Chen, S.-R. Jan, C.W. Liu. *Appl. Phys. Lett.* **98**, 101 106 (2011).
- [5] T.-H. Cheng, K.-L. Peng, C.-Y. Chen, H.-S. Lan, Y.-R. Wu, C.W. Liu, H.-H. Tseng. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 211 108 (2010).
- [6] J. Liu, X. Sun, D. Pan, X. Wang, L.C. Kimerling, T.L. Koch, J. Michel. *Opt. Express* **15**, 11 272 (2007).
- [7] J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L.C. Kimerling, J. Michel. *Opt. Lett.* **35**, 679 (2010).
- [8] А.М. Емельянов. *ФТП* **44**, 1170 (2010).
- [9] А.М. Emel'yanov. In: *High-efficiency solar cells. Physics, materials, and devices.* Springer Internatioal Publ., Switzerland (2014). P. 59–83.
- [10] А.М. Емельянов. *ФТП* **49**, 463 (2015).