

стве параметра, характеризующего уровень легирования) для двух температур, соответствующих областям увеличения и уменьшения $\Delta\sigma$ с ростом температуры. Слабая зависимость $\Delta\sigma$ при $T = 300$ К от легирования и соответственно от концентрации дефектов связана с тем, что, как было показано выше, в области комнатных температур величина $\Delta\sigma$ определяется плотностью состояний в хвосте валентной зоны. Это, в частности, может объяснить уменьшение $\Delta\sigma$ в образце с максимальным уровнем легирования $k = 10^{-3}$ (рис. 1). Действительно, согласно [13], в сильно легированных бором образцах α -Si : H возрастает структурная неоднородность, что может привести к увеличению плотности состояний в хвосте валентной зоны. В то же время представленное на рис. 2 изменение $\Delta\sigma$ с легированием при $T = 400$ К связано с изменением при легировании концентрации нейтральных оборванных связей, которое определяется двумя факторами: увеличением полной концентрации дефектов при легировании и уменьшением относительной концентрации N_0^0 вследствие смещения положения E_f к валентной зоне [4].

Авторы выражают искреннюю признательность В. Фусу и Х. Меллу за предоставление образцов для исследований.

Список литературы

- [1] Vanier P. E., Delahoy A. E., Griffith R. W. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. N 8. P. 5235—5242.
- [2] Hoheisel M., Fuhs W. // Phil. Mag. B. 1988. V. 57, N 3. P. 411—419.
- [3] Казанский А. Г., Климашин И. В., Кузнецов С. В. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 9. С. 1628—1631.
- [4] LeComber P. G., Spear W. E. // Phil. Mag. B. 1986. V. 53. N 1. P. L1—L7.
- [5] Jousse D. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. N 21. P. 1438—1440.
- [6] Stutzman M., Jackson W. B. // Sol. St. Commun. 1987. V. 62. N 3. P. 153—158.
- [7] Street R. A., Winer K. // Phys. Rev. B. 1989. V. 40. N 9. P. 6236—6249.
- [8] Поуз А. Основы теории фотопроводимости, М., 1966. 192 с.
- [9] Simmons J. G., Taylor G. W. // Phys. Rev. B. 1971. V. 4. N 2. P. 502—511.
- [10] Kakalios J., Street R. A. // Phys. Rev. B. 1986. V 34. N 8. P. 6014—6017.
- [11] Overhof H., Thomas P. // Electronic Transport in Hydrogenated Amorphous Semiconductors (V. 114) of Springer Tracts in Modern Physics / Ed. by G. Hohler, E. A. Niekish. 1989.
- [12] Вавилов В. С., Казанский А. Г., Миличевич Е. П. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 11. С. 2051—2053.
- [13] Beyer W., Wagner H., Mell H. // Sol. St. Commun. 1981. V. 39. N 2. P. 375—379.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Получено 12.03.1991
Принято к печати 4.04.1991

ФТП, том 25, вып. 8, 1991

ОБРАЗОВАНИЕ ЦЕНТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРЕМНИИ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ УГЛЕРОДА

Мудрый А. В., Патук А. И., Шакин И. А.

Образование первичных дефектов и комплексов с их участием в кремнии, облученном электронами при температурах < 200 К, было зарегистрировано с помощью методов электронного парамагнитного резонанса, инфракрасного поглощения и нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней [1–5]. Установлено, что при низкотемпературном облучении в кристаллах образуются вакансии, дивакансии, междоузельные примесные атомы алюминия, бора, галлия, комплексы с собственными междоузельными атомами кремния, углеродом и кислородом [1–5]. В [6, 7] исследовалась люминесценция кремния после низкотемпературного (~ 100 К) облучения электронами. Основным результатом этих работ явилось то, что образование оптически активных дефектов зарегист-

пировано при отжиге кристаллов вблизи комнатной температуры и примесный состав этих центров люминесценции определялся остаточными технологическими примесными атомами кислорода и углерода. Исследование процессов дефектообразования в кремнии при низкотемпературной (< 300 K) ионной имплантации с использованием методов оптической спектроскопии ранее не проводилось. Очевидно, что осуществление таких экспериментов важно для выявления основных особенностей поведения в кристаллах простейших дефектов — вакансий и междоузельных атомов, их участия в формировании различных комплексов, а также выяснения роли имплантированных атомов в процессах образования дефектов.

В настоящей работе представлены результаты исследования фотолюминесценции кремния, имплантированного ионами углерода (и для сравнения ионами водорода, гелия, неона, криптона), при низких температурах. Исследовались монокристаллы n - и p -типа проводимости с удельным сопротивлением от 1 до 3000 Ом·см, выращенные методом Чохральского или бестигельной зонной плавки. Облучение ионами в интервале энергий от 20 до 70 кэВ, плотностей тока 1—10 мкА/см² и доз 10^{15} — $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² проводилось при температурах 25, 80, 200, 250 и 300 K. Созданная аппаратура позволяла регистрировать спектры люминесценции кремния непосредственно в процессе имплантации ионов. Генерация неравновесных носителей заряда осуществлялась светом ксеноновой лампы сверхвысокого давления ДКСШ-1000 через водяной фильтр толщиной 10 см и ряд фильтров из стекла типа СЗС-22 и ВГ-17 (фирма «Карл Цейсс Йена») либо с помощью аргонового ($\lambda = 514.5$ нм) лазера ИЛА-120 (фирма «Карл Цейсс Йена»). Спектры анализировались монохроматором МДР-23 с дифракционной решеткой 600 штр/мм и дисперсией 26 Å/мм. В качестве детектора излучения использовалось охлаждаемое жидким азотом фотосопротивление на основе германия, компенсированного медью.

Спектр излучения, снятый непосредственно после облучения кристаллов кремния ионами углерода при температуре 25 K, представлен на рис. 1, а. Для исходного (необлученного) материала характерно наличие собственной люминесценции в области энергий 0.96—1.15 эВ. В результате бомбардировки ионами $^{12}\text{C}^+$ в кристаллах образуются дефекты, обуславливающие появление в спектрах люминесценции электронно-колебательной полосы с бесфононной линией 0.8559 эВ. Основные особенности низкоэнергетической структуры, сопутствующей бесфононной линии 0.8559 эВ, соответствуют максимумам плотности фононных состояний кристаллов кремния [8]. Необходимо отметить, что эта полоса была обнаружена ранее в спектрах фотолюминесценции кремния, облученного электронами при $T \leq 100$ K и впоследствии отожженного в течение 1 ч при комнатной температуре [7]. Основные особенности ионной имплантации таковы, что с увеличением дозы облучения в несколько раз уменьшается интенсивность собственного излучения и увеличивается интенсивность электронно-колебательной полосы 0.8559 эВ. Условия эксперимента позволяли настраивать монохроматор на длину волны 14486 Å (0.8559 эВ) и фиксировать изменение интенсивности полосы или производить запись спектра непосредственно в процессе облучения ионами, т. е. следить за динамикой накопления дефектов в кристалле в процессе ионной имплантации. В дополнение к этому был проведен ряд экспериментов по внедрению ионов углерода при различных температурах образцов: 80, 200, 250 и 300 K. В этом случае криостат с исследуемым кристаллом охлаждался жидким азотом до одной из указанных температур, которая стабилизировалась с точностью ± 2 K, проводилась бомбардировка ионами, а затем для регистрации спектров люминесценции криостат охлаждался жидким гелием до 25 K. Во всех случаях имплантации при указанных выше температурах интенсивность полосы 0.8559 эВ практически оставалась одинаковой. При минимально достижимой в наших условиях температуре имплантации ~ 25 K и последующем 20-минутном изохронном отжиге с шагом 25° до комнатной температуры интенсивность полосы 0.8559 эВ также изменялась незначительно. Выдержка имплантированных кристаллов при комнатной температуре в течение 10—30 мин приводила к видоизменению спектров люминесценции, состоящем в появлении электронно-колебательной полосы с бесфо-

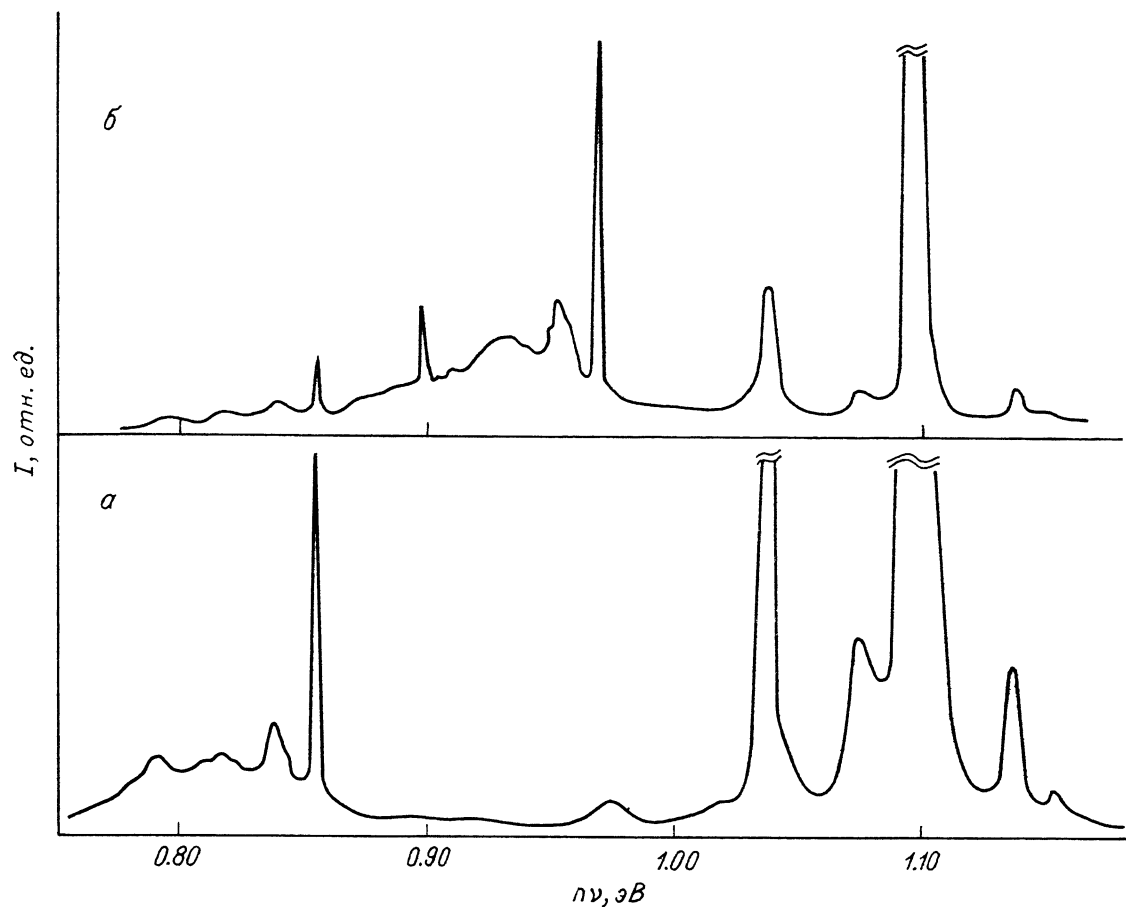


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции кремния (*p*-тип, $\rho \sim 2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), имплантированного ионами углерода с энергией 60 кэВ дозой $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при 25 К.

Спектральное разрешение 1.5 мэВ. *a* — непосредственно после имплантации, *б* — после имплантации при 25 К и отжига при комнатной температуре в течение 60 мин.

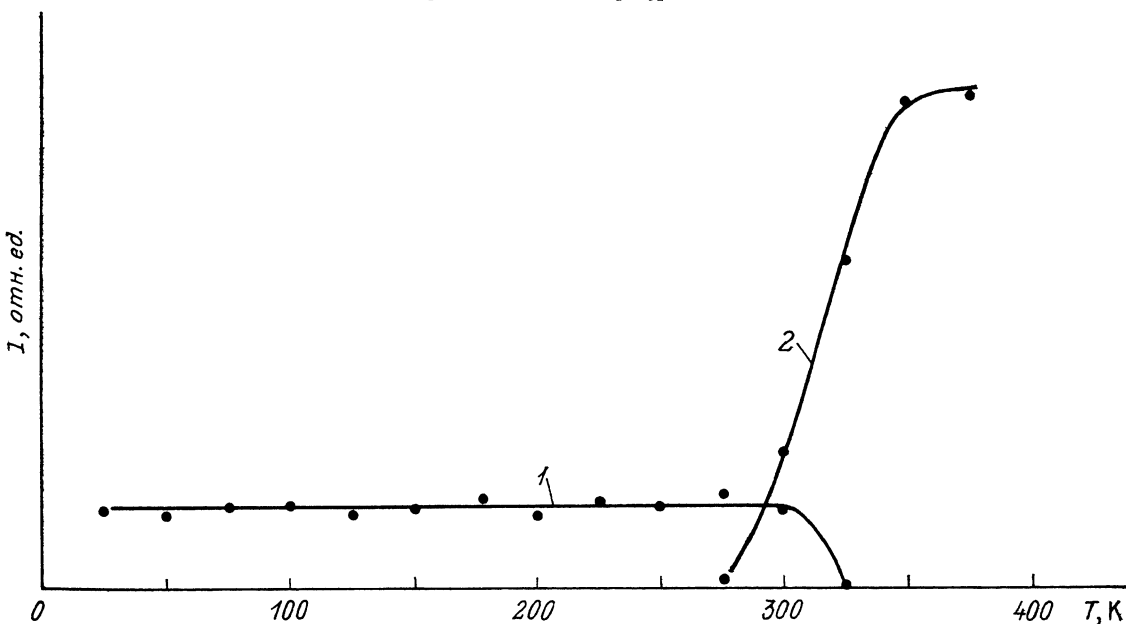


Рис. 2. Изменение относительной интенсивности полос люминесценции 0.8559 (1) и 0.9697 эВ (2) в зависимости от температуры изохронного (20 мин) отжига для кремния, имплантированного ионами $^{12}\text{C}^+$ при 25 К.

нонной линией 0.9697 эВ, рис. 1, б. Как известно, эта полоса связана с центром люминесценции, содержащем пару атомов углерода [⁹⁻¹²]. На рис. 2 представлены кривые изохронного отжига кремния, имплантированного ионами углерода при $T \sim 25$ К. Видно, что центры люминесценции, ответственные за полосу 0.8559 эВ, отжигаются при $T \sim 300-325$ К и одновременно начинают формироваться дефекты, обуславливающие полосу излучения 0.9697 эВ.

Необходимо отметить, что полоса 0.8559 эВ проявлялась в спектрах всех исследованных образцов вне зависимости от типа проводимости и метода выращивания исходных кристаллов. Контрольная имплантация других ионов, в частности неона, не приводила к появлению в спектрах полосы 0.8559 эВ. Эти экспериментальные факты указывают на то, что в состав дефектов, ответственных за полосу 0.8559 эВ, входит имплантированный углерод.

Таким образом, основной эффект низкотемпературного облучения кремния ионами ¹²C⁺ сводится к образованию дефектов, содержащих внедренный углерод и ответственных за полосу 0.8559 эВ. Из экспериментов, выполненных ранее по низкотемпературному (~ 100 К) электронному облучению, следовало, что центры люминесценции, обуславливающие в спектрах полосу 0.8559 эВ, образуются только вблизи комнатной температуры [7]. Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют об образовании углеродсодержащих центров при значительно более низких температурах (~ 25 К), что важно для физики радиационного дефектообразования в кремнии.

Существует несколько возможностей образования при низкотемпературной имплантации устойчивых центров, включающих углерод. Во-первых, внедренный атом(ы) углерода может локализоваться в междоузельном (или замещающем) положении, искажая ближайшее кристаллическое окружение до моноклинной симметрии [7]. Во-вторых, компоненты пары Френкеля способны мигрировать в область торможения иона углерода и взаимодействовать с ним, образуя стабильный комплекс углерод—простейший дефект (вакансия или междоузельный атом). Нельзя также, по-видимому, исключить и миграцию самих атомов углерода при низких температурах, способствующую формированию соответствующих дефектов.

Таким образом, в данной работе впервые проведено измерение люминесценции при низкотемпературной имплантации ионов в кремний и показано, что в отличие от [7] формирование центров люминесценции, ответственных за полосу 0.8559 эВ, происходит не при комнатной температуре, а при более низких температурах (по меньшей мере ≥ 25 К). Из этого следует, что центр 0.8559 эВ, возможно, представляет собой Si—G12-дефект, идентифицированный в [3] с помощью метода электронного парамагнитного резонанса.

Список литературы

- [1] Watkins G. D. // Rad. Damage Semicond. Paris, 1965. P. 97—111.
- [2] Newman R. C. Infra-Red Studies of Crystal Defects. London, 1973. 187 p.
- [3] Watkins G. D. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 36. N 22. P. 1329—1331.
- [4] Kimerling L. C., Blood P., Gibson W. M. // Def. Rad. Eff. Semicond. 1978. Phys. London, 1979. N 46. P. 273—280.
- [5] Lontos C. A. // Phys. St. Sol. (a). 1987. V. 102. N 2. P. 639—644.
- [6] Noonan J. R., Kirkpatrick G. G., Streetman B. G. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 7. P. 3010—3015.
- [7] Thonke K., Teschner A., Sauer R. // Sol. St. Commun. 1987. V. 61. N 4. P. 241—244.
- [8] Zdetis A. D., Wang C. S. // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. N 12. P. 2999—3007.
- [9] Konoplev V. S., Gippius A. A., Vavilov V. S. // Rad. Eff. Semicond. 1976. London, 1977. N 31. P. 244—250.
- [10] Thonke K., Klemisch H., Weber J., Sauer R. // Phys. Rev. B. 1981. V. 24. N 10. P. 5874—5886.
- [11] Davies G. // Phys. Rep. 1989. V. 176. N 3-4. P. 83—188.
- [12] O'Donnel K. P., Lee K. M., Watkins G. D. // Physica. 1983. V. B116. N 1-3. P. 258—263.

Институт физики твердого тела
и полупроводников АН БССР
Минск

Получено 25.03.1991
Принято к печати 4.04. 1991