

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В ОБЛАСТИ СПЕКТРА 3–5 МКМ

© 2012 г. И. М. Несмелова, доктор физ.-мат. наук; Н. И. Астафьев, канд. физ.-мат. наук;
Н. А. Кулакова, канд. физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: nrogipo@tnpko.ru

В работе рассмотрены особенности поглощения излучения в области спектра от 3 до 5 мкм монокристаллическим кремнием: зависимость коэффициента поглощения от удельного сопротивления в образцах *n*- и *p*-типов проводимости, дополнительное поглощение, связанное с внутризонными переходами электронов в зоне проводимости, влияние коротковолновой засветки на спектры пропускания. Из анализа расчетных и экспериментальных данных даются рекомендации по применению кремния в качестве оптической среды.

Ключевые слова: монокристаллический кремний, коэффициент поглощения, удельное сопротивление.

Коды OCIS: 160.1890.

Поступила в редакцию 22.11.2011.

Монокристаллический кремний, обладающий хорошей прозрачностью для излучения в диапазоне от $\lambda = 1,2$ мкм до $\lambda \approx 1000$ мкм (за исключением диапазона от 9 до 20 мкм [1]), является основным оптическим материалом на область спектра от 3 до 5 мкм. Область от 9 до 20 мкм имеет большое количество полос поглощения кислородом и решеткой. Основные электрофизические параметры кремния представлены в работе [2]. С длинноволновой стороны края основной полосы коэффициент поглощения α определяется поглощением излучения свободными носителями заряда. Концентрация носителей заряда в кремнии с собственной проводимостью при 300 К равняется $1,4 \times 10^{10}$ см⁻³, а удельное сопротивление ρ такого кремния равно $2,3 \times 10^5$ Ом см [3]. Реальные монокристаллы кремния содержат большое количество трудно отделяемых примесей бора и кислорода [3, 4], которые приводят к увеличению α вследствие повышения концентрации носителей заряда и их рассеяния на примесных центрах, а также к рассеянию излучения на кислородных комплексах. Минимальная концентрация кислорода в кремнии, реализованная при современной технологии выращивания, составляет 5×10^{15} см⁻³ [5]. Удельное сопротивление такого кремния $\rho = 100$ –200 Ом см. Предлагаемый авторами работы [1] монокристал-

лический кремний для инфракрасной (ИК) оптики имеет $\rho = 3$ –30 кОм см и концентрацию атомов кислорода 10^{16} см⁻³. В кристаллах с содержанием кислорода менее 10^{17} см⁻³, полученных бестигельной зонной плавкой, кислород является донорной примесью [6]. В них же обнаруживается примесь бора [7].

Кроме того, в кремнии *n*-типа проводимости наблюдается дополнительное поглощение в области спектра 1,5–5 мкм с максимумом у $\lambda = 2,3$ мкм, обусловленное непрямыми внутризонными переходами электронов в зоне проводимости [8, 9]. По данным работы [8] мы оценили вклад этих переходов в поглощение на область от 3 до 4 мкм, на которую приходится около 30% соответствующей им полосы поглощения. При температуре 300 К сечение поглощения фотонов для таких переходов почти на порядок величины меньше сечения друдовского поглощения на свободных электронах и их вкладом в поглощение для кристаллов с концентрацией электронов менее 10^{17} см⁻³ можно пренебречь. Однако, как следует из спектров поглощения кремния с примесью сурьмы, приведенных в работе [8] для разных температур, максимум поглощения у 2,3 мкм растет с увеличением температуры быстрее, чем друдовское поглощение. Может оказаться, что полоса, которая не наблюдается

при комнатной температуре, проявится при более высоких температурах.

Известно, что для качественной ИК оптики необходимы материалы с коэффициентом поглощения $10^{-2} \text{ см}^{-1} \leq \alpha \leq 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ [10]. На практике кремний, применяемый в качестве оптической среды, сертифицируется по удельному сопротивлению и типу проводимости. Эти характеристики не являются достаточными для оценки величины α [11]. Данные по ρ оптического кремния разных производителей различаются более чем на порядок. Отсюда возникает необходимость рассмотрения связи α с удельным сопротивлением в реальных монокристаллах кремния для ИК оптики.

В настоящей работе исследована зависимость коэффициента поглощения в области 3–5 мкм от удельного сопротивления кристаллического кремния n - и p -типов проводимости при комнатной температуре без учета внутризонных переходов и примесного поглощения. Коэффициент поглощения рассчитан с использованием экспериментальных данных о концентрации основных носителей заряда и их холловской подвижности, а также подвижности при рассеянии только на фононах. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными величинами коэффициента поглощения (ослабления) реальных образцов кремния. Найдены значения удельных сопротивлений, соответствующих значениям α оптического кремния в диапазоне $10^{-2} \text{ см}^{-1} \leq \alpha \leq 10^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Коэффициент поглощения за краем основной полосы и удельное сопротивление в зависимости от концентрации электронов n и дырок p в полупроводниках n - и p -типов рассчитывались по формулам Друде (в гауссовой системе единиц)

$$\alpha_n = \frac{e^3 \lambda^2 n}{\pi c^3 N \mu_n m_n}, \quad \alpha_p = \frac{e^3 \lambda^2 p}{\pi c^3 N \mu_p m_p},$$

$$\rho_n = \frac{1}{en\mu_n}, \quad \rho_p = \frac{1}{ep\mu_p},$$

где e , c , π – общепринятые физические константы,

μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок,
 m_n , m_p – их эффективные массы,
 N – показатель преломления.

Расчет проводился для длины волны $\lambda = 5$ мкм, эффективных масс $m_n = 0,26 m_0$, $m_p = 0,52 m_0$ (m_0 – масса свободного электрона), показателя преломления $N = 3,42$. Экспериментальные значения концентраций ос-

новных носителей заряда и соответствующие им холловские подвижности μ_{nx} и μ_{px} определялись из работ [12, 13]. Результаты вычислений представлены кривыми 1 на рис. 1 и 2 для кремния n - и p -типов соответственно. Кривыми 2 на рисунках даны расчетные зависимости α от ρ для рассеяния носителей заряда на фононах при значениях $\mu_{n\text{ф}} = 1350 \text{ см}^2/\text{В}$ с и $\mu_{p\text{ф}} = 480 \text{ см}^2/\text{В}$ с [2]. Треугольниками на рисунках обозначены экспериментальные значения коэффициентов ослабления, полученные из спектров пропускания реальных образцов кремния, представленных в работах [8, 14–16], и из наших экспериментов.

Из рисунков 1 и 2 следует:

– расчетные значения коэффициента поглощения кристаллического кремния p -типа несколько больше, чем кремния n -типа, с увеличением удельного сопротивления эти значения почти совпадают;

– при $\rho > 1$ Ом см, где рассеяние носителей заряда на примесях мало, кривые 1 и 2 близки друг к другу, что свидетельствует о преобладании фононного рассеяния носителей заряда;

– для кристаллов с $\rho \leq 1$ Ом см расчетные значения α (кривые 1), в которых отражены все виды рассеяния носителей заряда (с использованием экспериментальных величин подвижностей), лежат выше значений, учитывающих рассеяние только на фононах (кривые 2);

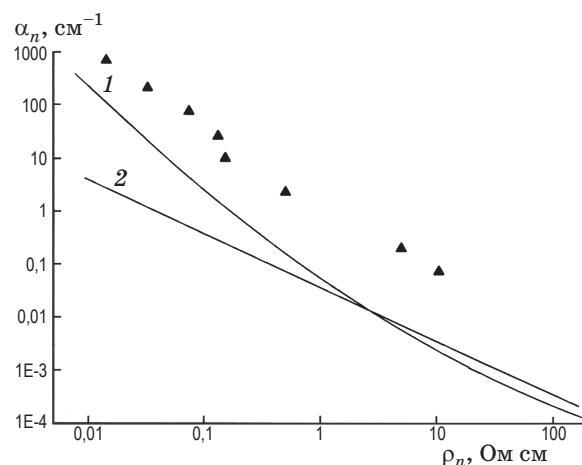


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения монокристаллического кремния n -типа от удельного сопротивления на длине волны 5 мкм, 300 К. Расчетные кривые: 1 – с величинами n и μ_{nx} из работ [12, 13], 2 – при $\mu_{n\text{ф}} = 1350 \text{ см}^2/\text{В}$ с для рассеяния электронов на фононах; треугольники – эксперимент.

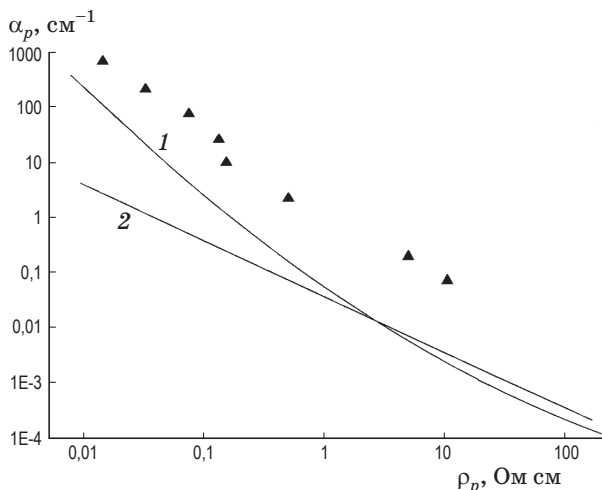


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения монокристаллического кремния p -типа от удельного сопротивления на длине волны 5 мкм, 300 К. Расчетные кривые: 1 – с величинами ρ и μ_{px} из работ [12, 13], 2 – при $\mu_{pф} = 480 \text{ см}^2/\text{В с}$ для рассеяния дырок на фононах; треугольники – эксперимент.

– экспериментальные значения, отражающие и ослабление световой волны за счет ее рассеяния на дефектах структуры, заметно превышают значения расчетного друдовского поглощения, в особенности для образцов p -типа.

Экспериментальные данные о коэффициенте ослабления образцов p -типа были получены из спектров пропускания кремния, легированного бором. При наличии в нем кислорода имеет место геттерирование последнего бором с образованием рассеивающих излучение центров, подобным кислородно-кремниевым комплексам [6, 17]. Частично наблюдаемый результат о большем коэффициенте ослабления кремния p -типа мог появиться за счет методики измерения спектров пропускания [18].

Нами выполнены измерения пропускания нескольких образцов монокристаллического кремния n - и p -типов толщиной 5 мм с различ-

ными значениями удельного сопротивления на спектрометре EGVINOX-55 без фильтра и с фильтром, отсекающим излучение от источника излучения до 1,1 мкм. Поверхность образцов была подвергнута сначала химической, а затем оптической полировке. Пропускание химически полированных образцов без фильтра было на уровне 15–20% в области до 6 мкм. При измерениях с фильтром оно возросло в 2–3 раза. Оптически полированные образцы показали увеличение пропускания на 2–4%. Значительная разница в пропускании образцов с фильтром и без фильтра отмечалась для образцов p -типа. Различие реакции на засветку, генерирующую электронно-дырочные пары в приповерхностном слое n - и p -типов кремния, может быть результатом различия механизма рекомбинации неосновных носителей заряда и их сечений поглощения фотонов. В кремнии n -типа избыточные дырки, сечение поглощения которых превышает сечение поглощения для электронов, с большей вероятностью попадают на центры рекомбинации, чем захватываются уровнями прилипания. Электроны в кремнии p -типа испытывают многократный захват ловушками, прежде чем рекомбинируют с дырками, увеличивая тем самым эффективное время участия последних в поглощении ИК излучения за краем основной полосы [19].

Таким образом, согласно нашим расчетным данным, монокристаллический кремний с $\alpha \leq 2 \times 10^{-2}$ и $\rho > 1 \text{ Ом см}$, в котором примесное рассеяние носителей заряда незначительно, может быть рекомендован для применения в качестве оптической среды в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Такой же коэффициент ослабления имеют реальные монокристаллы кремния n -типа с $\rho > 3 \text{ Ом см}$ и p -типа с $\rho > 40 \text{ Ом см}$. Для оптических деталей, подвергающихся высокотемпературному нагреву при эксплуатации (например, обтекателей), предпочтительным является монокристаллический кремний p -типа.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.tydex.ru>
2. Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Справочник. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.
3. Смит Р. Полупроводники / Под ред. Жузе В.П. М.: ИЛ, 1962. 467 с.

4. *Танненбаум М.* Выращивание кристаллов полупроводника. Полупроводники / Под ред. Хеннея Н.Б. М.: ИЛ, 1962. 667 с.
 5. *Плотниченко В.Г., Назарьянц В.О., Крюкова Е.Б., Колташов В.В., Соколов В.О., Гусев А.В., Гава В.А., Чурбанов М.Ф., Дианов Е.М.* Показатель преломления монокристаллов моноизотопных ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si в ближнем и среднем ИК диапазонах // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 9. С. 753–755.
 6. *Кайзер В.* Электрические и оптические свойства термообработанного кремния. Рекомбинация носителей тока в полупроводниках / Под ред. Бонч-Бруевича В.А. М.: ИЛ, 1959. 140 с.
 7. *Бьюб Р.* Фотопроводимость твердых тел. М.: ИЛ, 1962. 558 с.
 8. *Spitzer W., Fan H.Y.* Infrared absorption in n-type Silicon // Phys. Rev. 1957. V. 108. № 2. P. 268–271.
 9. *Мосс Т., Барелл Г., Эллис Б.* Полупроводниковая оптоэлектроника. М.: Мир, 1976. 431 с.
 10. *Marsh K.J., Savagr J.A.* Infrared optical materials for 8–13 μ – current developments and future prospects // Infrared. Phys. 1974. V. 14. № 2. P. 85–97.
 11. *Несмелова И.М., Астафьев Н.И., Несмелов Е.А.* Зависимость коэффициента поглощения кристаллического германия в ИК области спектра от удельного сопротивления // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 88–92.
 12. *Wolfstirn K.B.* Hole and electron mobilities in doped silicon from radiochemical and conductivity measurements // J. Phys. Chem. Solids. 1960. V. 16. P. 279–284.
 13. *Sze S.M., Irvin J.C.* Resistivity, mobility and impurity levels in GaAs, Ge and Si at 300 K // Solid-State Electronics. 1968. V. 11. P. 599–602.
 14. *Вавилов В.С.* Действие излучений на полупроводники. М.: изд-во Физико-математической литературы, 1963. 264 с.
 15. *Лоткова Э.Н.* Исследование инфракрасного спектра поглощения кремния, облученного нейтронами. Электрические и оптические свойства полупроводников // Труды ФИАН. 1966. Т. 37. С. 103–148.
 16. *Фэн Х., Беккер М.* Оптические свойства кремния и германия в инфракрасной области спектра. Полупроводниковые материалы / Под ред. В.М. Тучкевича. М.: ИЛ, 1954. 370 с.
 17. *Ковтонюк Н.Ф., Коцевой Ю.А.* Измерение параметров полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1970. 424 с.
 18. *Астафьев Н.И., Несмелова И.М., Несмелов Е.А.* Особенности полупроводниковых материалов как оптических сред для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 90–93.
 19. *Хорнбек Д., Хэйнс Д.* Захват неосновных носителей тока в кремнии. Проблемы физики полупроводников / Под ред. Бонч-Бруевича В.А. М.: ИЛ, 1957. 629 с.
-